

공학석사 학위논문

# 중단채광법 석회석 광산의 최적 광주 회수 조건에 대한 수치해석적 연구

Numerical Analysis Study on Optimum Pillar Recovery  
Condition of Limestone Mine by Sublevel Stoping

지도교수 장 원 일



2010년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

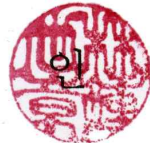
김 동 호

본 논문을 김동호의 공학석사  
학위논문으로 인준함.

위원장 신 성 렬



위 원 임 종 세



위 원 장 원 일



2009년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

Abstract	1
초 록	2
1. 서 론	3
1.1 연구배경	3
1.2 중단채광법 및 연구대상광산	6
1.3 연구방법 및 적용모델	9
2. 본 론	10
2.1 중단간격 검토	10
2.1.1 광주에서의 응력집중	10
2.1.2 지반모델링 및 입력변수	12
2.1.3 기존자료 검토	16
2.1.4 응력해석	18
2.2 광주 회수 계획 검토	35
2.2.1 측압계수 결정	36
2.2.2 지반모델링	37
2.2.3 회수방향에 따른 해석	40
2.2.4 2개 및 3개 광주 연속 회수	44
2.2.5 보안광주 높이에 따른 채광	48
2.2.6 광맥 경사에 따른 비교	51
3. 결론	55
참고문헌	56

# List of Figures

Fig. 1.1	Number of operating limestone mines and workers . . .	4
Fig. 1.2	Statistics of mine disasters in 2005 . . . . .	5
Fig. 1.3	Example of underground mining method in the limestone quarries	6
Fig. 1.4	A mining plan of the studied mine . . . . .	8
Fig. 1.5	The Mohr-Coulomb failure criterion . . . . .	9
Fig. 2.1	Redistribution of stress in the axial direction of a pillar accompanying stope development	10
Fig. 2.2	Schematic layout for ground modeling and boundary condition for numerical model	14
Fig. 2.3	Numerical modeling in FLAC 3D . . . . .	15
Fig. 2.4	Concentrated stress of previous study . . . . .	17
Fig. 2.5	Concentrated stress with increasing vertical pillar width	23
Fig. 2.6	Maximum stress distribution of vertical pillar(case1)	25
Fig. 2.7	Maximum stress distribution of vertical pillar(case2)	26
Fig. 2.8	Maximum stress distribution of vertical pillar(case3)	27
Fig. 2.9	Concentrated stress with increasing horizontal pillar height	29
Fig. 2.10	Horizontal stress distribution of horizontal pillar(case1)	31
Fig. 2.11	Horizontal stress distribution of horizontal pillar(case2)	32
Fig. 2.12	Horizontal stress distribution of horizontal pillar(case3)	33

Fig. 2.13	Schematic layout for numerical model	38
Fig. 2.14	Numerical modeling in FLAC 3D . . . . .	39
Fig. 2.15	Displacement versus recovery directions	41
Fig. 2.16	Plasticity state relating to recovery directions . . . . .	43
Fig. 2.17	Schematic layout of remaining pillars . . . . .	45
Fig. 2.18	Plasticity state relating to recovery of pillar . . . . .	47
Fig. 2.19	Concentrated stress on residual pillar with increasing pillar height	48
Fig. 2.20	Plasticity state relating to pillar height(residual pillar 1)	49
Fig. 2.21	Plasticity state relating to pillar height(residual pillar 2)	50
Fig. 2.22	Schematic layout versus various degree angles of orebody for numerical model	52
Fig. 2.23	Displacement versus various degree angles of orebody	53

## List of Tables

Table 2.1	Cases of cave shape . . . . .	12
Table 2.2	Various width of vertical pillar . . . . .	13
Table 2.3	Various height of horizontal pillar . . . . .	13
Table 2.4	Input parameter for the numerical model . . . . .	15
Table 2.5	Concentrated stress of vertical pillar(case1) . . . . .	18
Table 2.6	Concentrated stress of vertical pillar(case2) . . . . .	19
Table 2.7	Concentrated stress of vertical pillar(case3) . . . . .	19
Table 2.8	Concentrated stress of horizontal pillar(case1) . . . . .	20
Table 2.9	Concentrated stress of horizontal pillar(case2) . . . . .	20
Table 2.10	Concentrated stress of horizontal pillar(case3) . . . . .	21
Table 2.11	Induced stresses in pillar by the recovery plan . . . . .	46

# Numerical Analysis Study on Optimum Pillar Recovery Condition of Limestone Mine by Sublevel Stoping

Kim Dong Ho

Department of Ocean Development Engineering  
*Graduate School of*  
*Korea Maritime University*

## Abstract

Recently, the efficient mining under maintaining the stability of underground openings is a matter of grave concern. Because the mining methods are changing from surface mining to underground mining with an increase of environmental problems and legal regulations. In this paper, a optimum mining plan for limestone mine using sublevel stoping method is discussed usually applied in inland areas. First, concentrated stress is analyzed according to various width and height of pillar to determine a distance between sub-levels. And three dimensional numerical analysis has been performed using FLAC3D, based on mining plan of study mine. Numerical analysis on optimum pillar recovery condition of recovery direction and recovery of two or three consecutive pillars, severe failure appeared at the areas that around pillar and lateral wall. Accordingly, a optimum recovery plan is suggested through analysis of stability associated with increasing height of non-recovery pillar. Also, pillar recovery is studied to consider effect of orebody angles. As result of study, remaining pillar is designed safely to consider concentrated stress according to width and height of cave and effect of orebody angles.

# 중단채광법 석회석 광산의 최적 광주 회수 조건에 대한 수치해석적 연구

김 동 호

해양개발공학과  
한국해양대학교 대학원

## 초 록

최근 국내 광산은 환경문제와 법적규제 강화의 영향으로 갯외채광에서 갯내 채광으로 전환됨에 따라 공동의 안전성이 유지된 상태에서 효율적인 채광이 주된 관심사가 되고 있다. 본 논문에서는 국내 내륙지방 석회석 광산에서 많이 사용하는 채광법 중의 하나인 중단채광법에 따른 적절한 채광 계획에 대하여 검토하였다. 먼저 중단 사이의 간격을 결정하기 위하여 다양한 광주의 폭과 넓이에 따른 광주에서의 응력집중을 해석하였다. 그리고 연구대상 광산의 채광계획을 토대로 FLAC3D를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 광주의 회수 방향, 연속된 2개 및 3개 광주 회수 등에 대해 해석한 결과, 연구대상 광산 공동의 측벽과 광주에서 소성영역이 발생할 것으로 사료되었고, 따라서 보안광주의 높이에 따른 해석을 수행하여 대상광산에서 적절한 광주 회수계획을 검토하였다. 또한 채광시 광맥 경사에 따른 갯도 안정성에 대해 비교 검토하였다. 연구결과 석회석광산에서 중단채광법 적용시 공동의 폭과 높이에 따른 응력집중과 경사에 따른 영향을 고려하여 보안광주를 안전하게 설계 하여야 할 것으로 사료된다.



# 1. 서론

## 1.1 연구배경

현재 우리나라의 광업개발환경은 값싼 해외광물자원의 수입에 따른 경쟁력 약화와 생활수준 향상에 따른 에너지 수요패턴의 변화, 국내 광물자원의 품위 저하, 환경운동에 의한 개발억제 등이 복합적으로 작용함으로써 국내 광업관련 활동이 현저히 저하되어 어려운 상황에 처해 있다. 그러나 광물자원은 산업에 필요한 1차 원료로 산업발전과 자원자급을 확대를 위해서는 반드시 지원 육성하여야 할 분야로서 대내외적인 조건들이 개선되기 위해서는 부존자원의 제약, 기술개발, 규제완화와 근로자 확보, 과중한 물류비의 부담, 환경과 관련된 문제 등이 해결되어야 한다.(선우춘 등, 2003)

석회석 광산은 국내 광산물 판매액의 약 66%를 점유하고 있는 대표적인 비금속 광종으로, 개발방식은 크게 노천채광과 갱내채광으로 구분할 수 있다(구청모 등, 2008). 시멘트용으로 이용되는 비교적 저품위의 석회석은 현재 노천 채광방식을 채택하여 대규모로 채광을 하고 있으며, 제철, 제강 및 화학제품의 원료로 이용되는 고품위(CaO 52%이상) 석회석은 갱내채굴방식에 의해 소규모로 개발되어 왔으나, 최근 산지관리법, 백두대간보호에 관한 법률 등의 제정으로 환경관련규제가 강화되면서 점차적으로 갱외채광에서 갱내채광으로 전환되고 있다(구청모 등, 2008). 따라서 Fig. 1.1에서 보듯이 석회석 광산의 갱외종사자 수는 크게 줄어들고 있지만 갱내종사자 수는 오히려 꾸준히 증가하고 있는 추세이다.

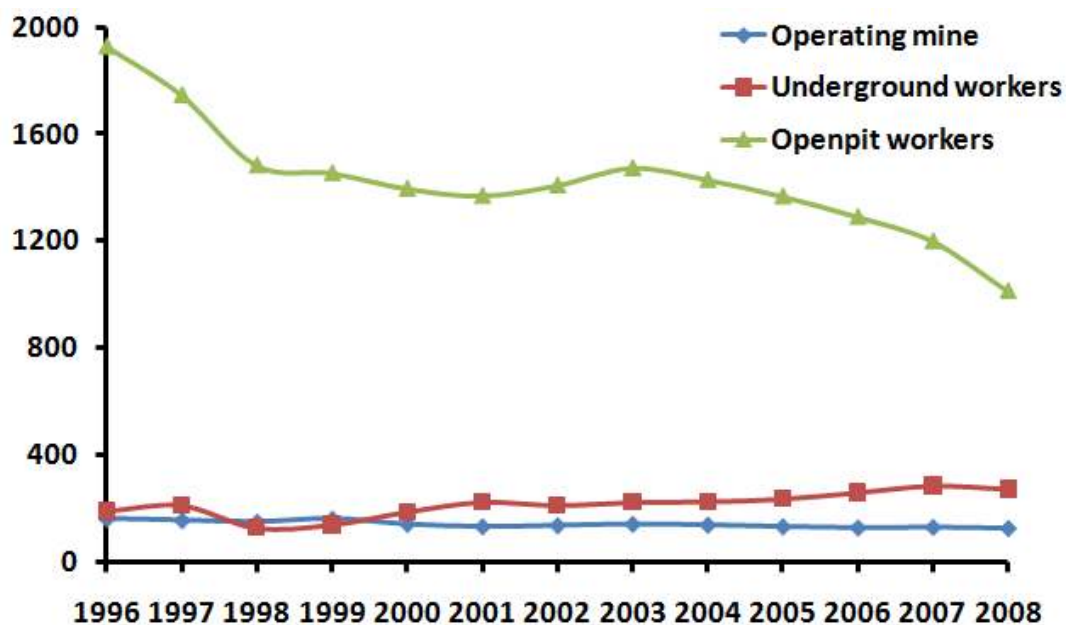


Fig. 1.1 Number of operating limestone mines and workers  
(지식경제부와 한국지질자원연구원, 1996~2008)



고품질 석회석을 채광하는 경우 갱도를 소형으로 유지해도 문제가 없으나 시멘트용으로 사용되는 석회석을 갱내채광으로 생산하여 생산비를 낮추기 위해서는 대형 장비의 투입이 요구되고, 장비의 원활한 가동을 위해서는 작업공간과 이동공간을 확보하기 위해 대규모 갱도의 설계가 필요하다(윤용균과 이홍우, 2007). 그러나 국내 대부분의 석회석 갱내채광 광산들은 객관적인 설계기준 없이 상황에 따라 광주와 갱도의 크기를 달리하여 채굴하고 있으므로 지반조건이 불리할 경우 천반을 비롯하여 측벽에서도 붕락이 발생하여 갱도의 안전성뿐만 아니라 작업원의 작업조건 악화로 인해 Fig. 1.2와 같은 재해 발생 우려가 있기 때문에 석회석 광산의 채굴장 및 광주를 안정성 있게 설계할 필요가 있다(신희순 등, 1999).

또한 광산채굴 공동들은 요구되는 수명 이상으로 유지될 수 있어야 하므로, 광산운영에 있어서 경제성 문제와 더불어 구조적인 안정성 문제는 광산설계 뿐만 아니라 운영에서도 매우 중요한 요소가 된다(선우춘과 정용복, 2006). 따라서 본 논문에서는 국내 내륙지방 석회석 광산에서 많이 사용하는 채광법 중의 하나인 중단채광법을 적용할 경우에 대하여 3차원 수치해석을 실시하여, 안정적이며 효율적인 채광계획에 대하여 검토하였다.

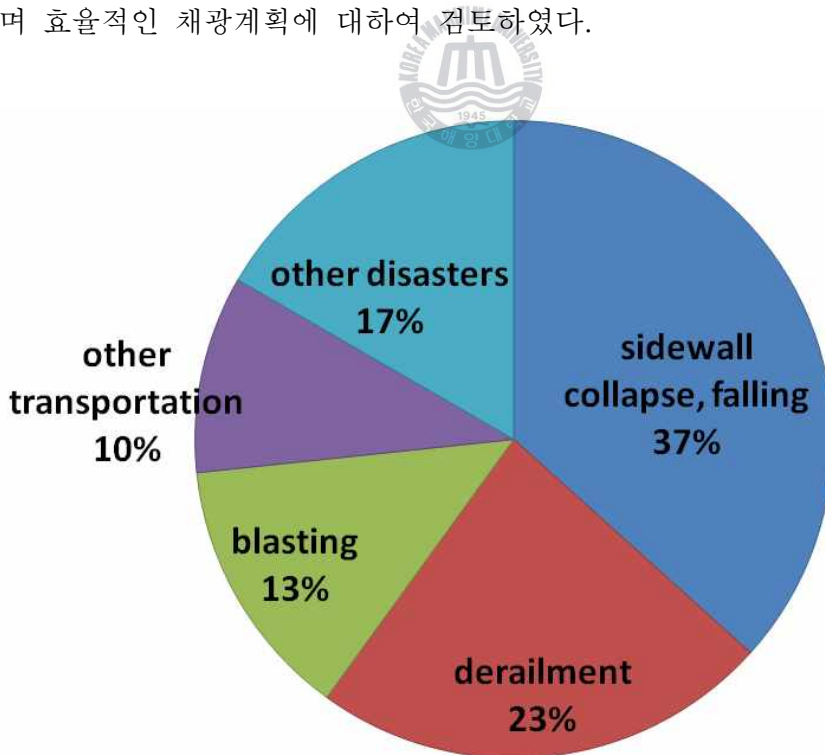
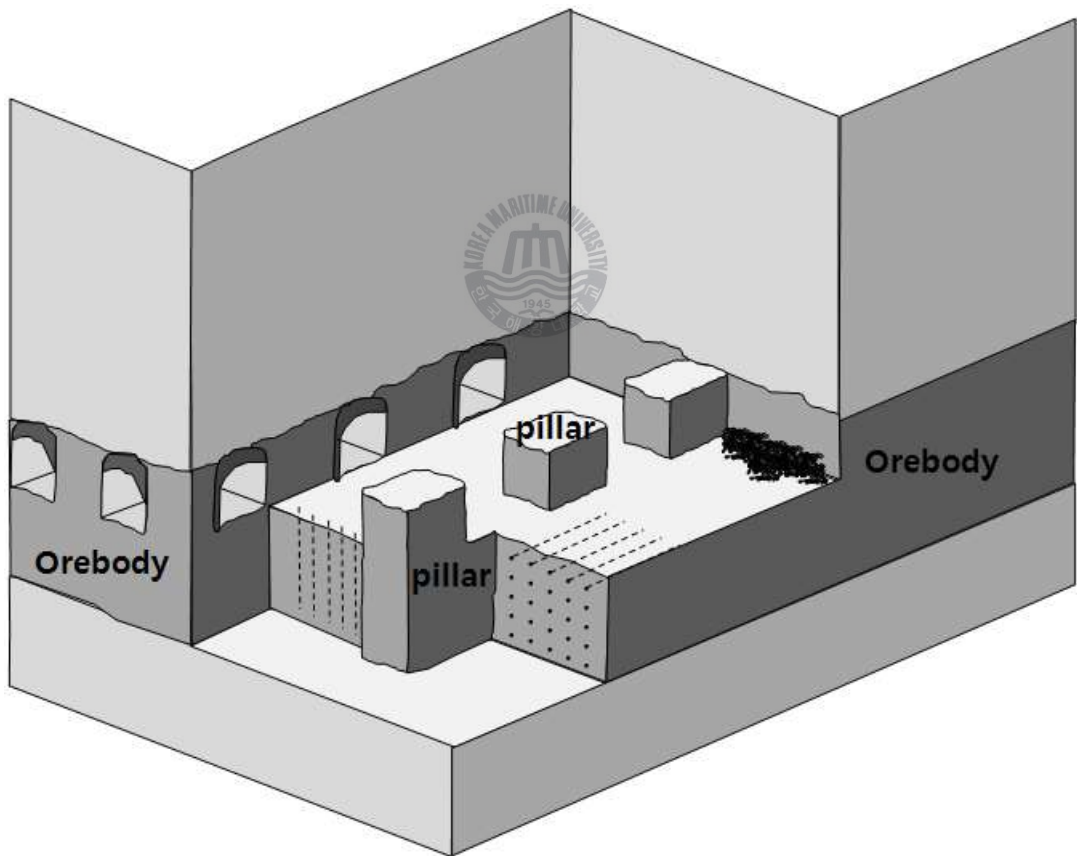


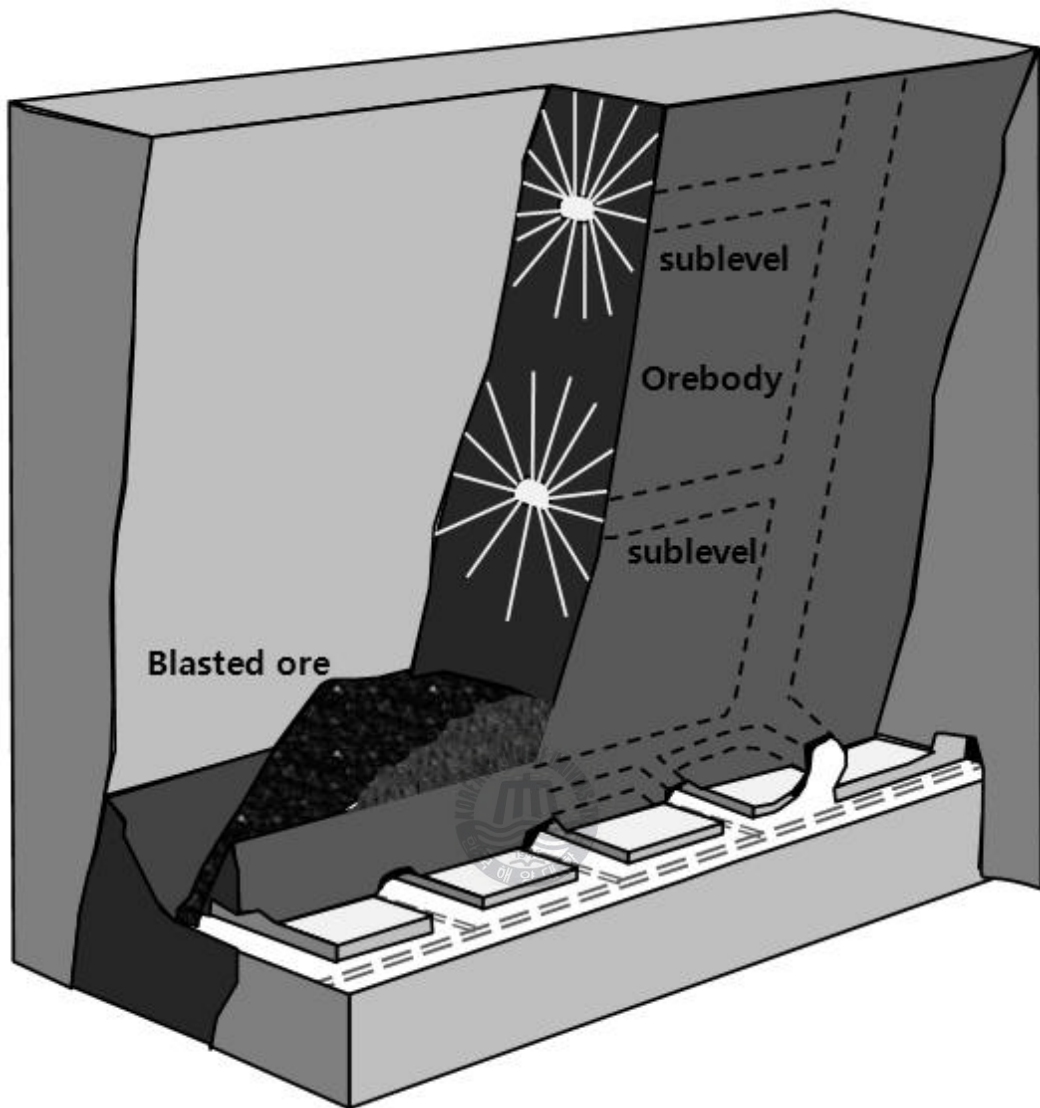
Fig. 1.2 Statistics of mine disasters in 2005(한국광물자원공사, 2006)

## 1.2 중단채광법 및 연구대상광산

국내 갱내채광 석회석 광산에서 사용하고 있는 채광법은 주방식채광법(Fig. 3.1(a))이 16개소로 70%, 중단채광법(Fig. 3.1(b))이 5개소로 22%를 차지하고 있어 주방식채광법이 주류를 이루고 있음을 알 수 있다(선우춘 등 2003). 하지만 내륙지방의 광맥 경사가 급한 대다수 석회석 광산에서는 추후 중단채광법으로 전환하여 광주를 회수할 계획을 가지고 있다. 중단채광법은 광상과 모암이 모두 견고하고 광맥의 폭이 6~10m 이상, 경사는 45~50°이상인 광산에 적용할 수 있는 채광법으로 일정 간격으로 중단갱도를 채광한 후 그 사이의 장공발파 하여 채광하는 방법이다(김웅수, 1998).



(a)



(b)

Fig. 1.3 Example of underground mining method in the limestone quarries (a) room and pillar mining (b) sublevel stoping

연구대상광산인 제천지역 A 석회석광산의 광체 형상은 향사구조를 가지는 가창산 향사이며, 갑산층 중부석회석을 대상으로 개발하고 있다. 대체적인 향사의 주향은 N5~30W이고 경사는 65SW 내지 수직과 65NE내지 수직인 광체모양으로 중단채광법을 적용하기 위해 Fig. 1.4와 같이 여러 중단을 굴착하여 광체가 수평광주와 같이 남아있는 상태이다. 본 논문에서는 채광 설계를 위한 중요한 요소가 되는 중단 간격을 결정하고, 연구대상광산에서 적절한 광주 회수 계획에 대하여 검토해 보았다.

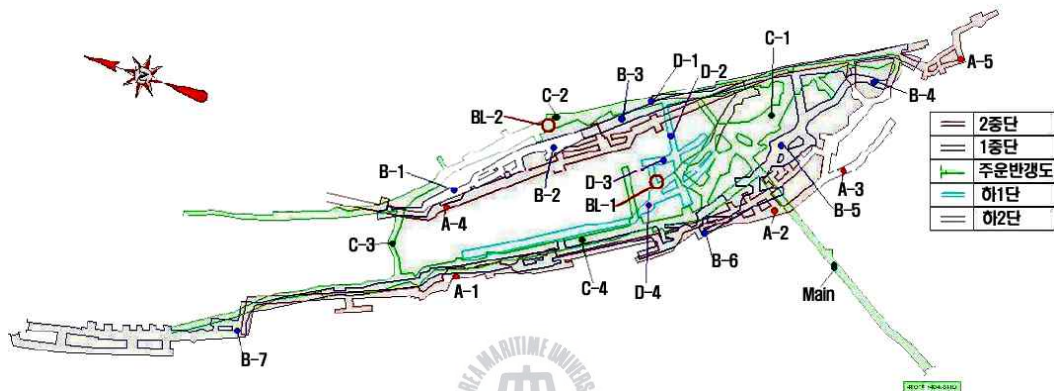


Fig. 1.4 A mining plan of the studied mine

### 1.3 연구방법 및 적용모델

해석은 비교적 정밀하고 비용이 적게 드는 수치해석적 방법을 사용하였으며, Mohr-Coulomb 모델을 적용한 연속체 해석을 실시하였다. 해석에 사용한 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D는 공학적 계산을 위해 제작된 3차원 음해함수 유한차분(explicit finite difference) 프로그램이며 3차원 연속체 공간을 유한차분망(finite difference mesh)으로 원하는 만큼 자세하게 분할하여 임의의 위치에서 각각의 지배방정식의 해(Solution)를 구할 수 있다(ITASCA Consulting, 2006).

또한 적용 모델인 Mohr-Coulomb 식은 압축응력형태의 가장 일반적인 파괴 형태인 전단파괴 조건식으로, FLAC 3D에서는 체적탄성계수, 전단탄성계수, 마찰각, 점착력 등을 입력변수로 적용한다. 식 (1.1)과 Fig. 1.5는 Mohr-Coulomb 모델의 식과 파괴 기준이다(Goodman, 1989). FLAC 3D에서는 해석 결과로 각 방향에 대한 응력과 변위를 제공하며, Mohr-Coulomb 모델을 적용할 경우 조건식을 적용하여 소성영역을 표시할 수 있어 해석요소로 사용되고 있다.

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c \quad (1.1)$$

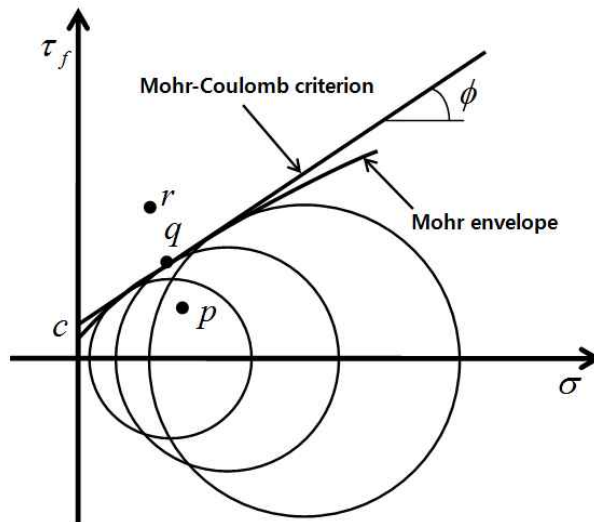


Fig. 1.5 The Mohr-Coulomb failure criterion

## 2. 본 론

### 2.1 중단 간격 검토

#### 2.1.1 광주에서의 응력집중

중단채광법의 준비단계로 일정 간격으로 중단을 굴착할 경우 중단의 크기와 중단 사이의 간격을 결정하는 것이 중요한 요소이다. 중단과 중단 사이, 즉 광주에 작용하는 응력은 Fig. 2.1에서와 같이 초기응력상태의 암반에서 공동이 굴착되면서 응력이 집중되므로 광주의 폭과 공동의 폭에 영향을 받는다(Brady and Brown, 2004).

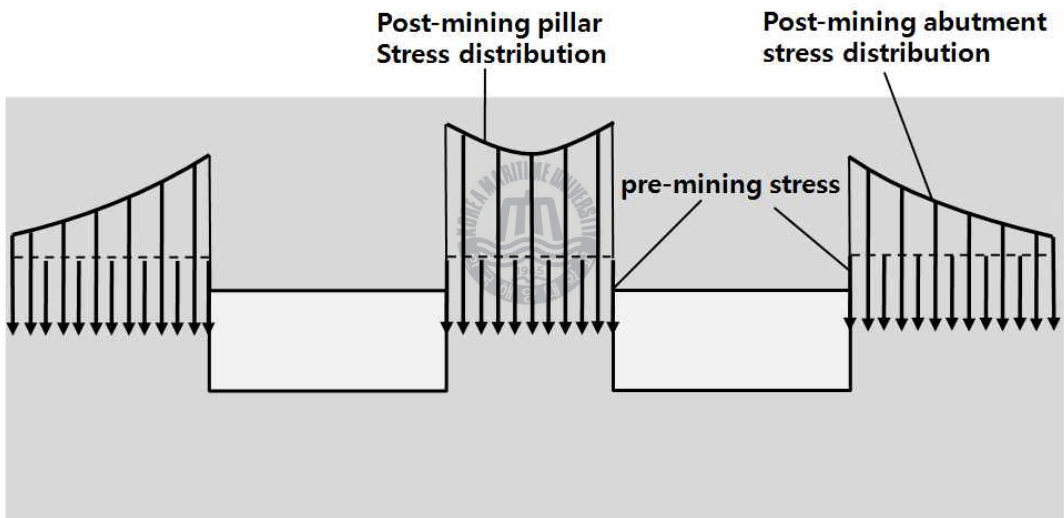


Fig. 2.1 Redistribution of stress in the axial direction of a pillar accompanying stope development

두 개의 인접한 공동 사이의 광주에 작용하는 응력은 공동의 형상과 이격 거리에 의존한다. Obert와 Duvall(1976)은 평행하게 배치된 다수의 원형 공동에 대한 광탄성 해석을 수행하였으며, 그 결과 공동 사이에 위치한 Pillar의 중간 높이에서의 평균수직응력( $\sigma_p$ )을 계산 할 수 있는 식을 다음과 같이 제시하였다.



$$\sigma_p = (1 + W_o/W_p)/P_z \quad (2.1)$$

여기서  $W_o$ 는 공동의 폭,  $W_p$ 는 광주의 폭이고  $P_z$ 는 작용하는 외력을 의미한다. 위 식에 의하면 광주의 평균수직응력은 광주가 좁을수록 커짐을 알 수 있다. 따라서 광주의 폭이 너무 작을 경우 파괴가 발생할 수 있고, 반대로 넓을 경우에는 채광율이 떨어지게 된다. 따라서 안전한 응력의 분포를 갖는 적절한 중단 간격을 결정할 필요가 있다.



## 2.1.2 지반모델링 및 입력변수

본 논문에서는 중단 간격에 따른 광주에서의 응력집중을 해석하기 위해 두 개의 갱도가 좌우로 평행한 수직광주와 상하로 수직한 수평광주에 대하여 광주의 폭( $W_p$ )과 높이( $W_h$ )를 달리 하면서 수치해석을 실시하였다. 공동 형상에 따른 영향을 비교하기 위해 Table 2.1과 같이 원형 및 갱내광산에서 가장 많이 쓰이는 공동 형상인 정방형과 장방형으로 구분하였다. 해석은 광주 폭과 높이를 Table 2.2와 Table 2.3에서와 같이 다양하게 하면서 광주 중심에서의 응력변화를 비교하였다.

Table 2.1 Cases of cave shape

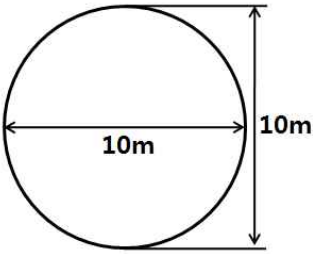
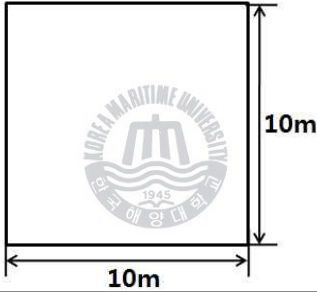
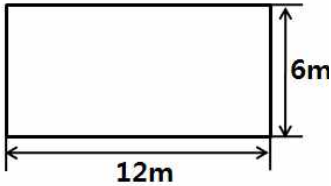
Case1	Case2	Case3
Circle	Square	Rectangle
		

Table 2.2 Various width of vertical pillar

Case1	$W_p$	2	3	4	5	7	10	15	20	25	30	35	40
	$W_p/W_o$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Case2	$W_p$	2	3	4	5	7	10	15	20	25	30	35	40
	$W_p/W_o$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Case3	$W_p$	2	3	4	6	8	12	18	24	30	36	42	48
	$W_p/W_o$	0.17	0.25	0.33	0.5	0.67	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

Table 2.3 Various height of horizontal pillar

Case1	$H_p$	2	3	4	5	7	10	15	20	25	30	35	40
	$H_p/H_o$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Case2	$H_p$	2	3	4	5	7	10	15	20	25	30	35	40
	$H_p/H_o$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Case3	$H_p$	2	3	4	6	8	9	12	15	18	21	24	
	$H_p/H_o$	0.33	0.5	0.67	1.0	1.33	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	

해석 지반은 Fig. 2.2와 같이 150m×100m×150m(가로×세로×높이)로 광주의 중심은 심도 75m에 위치하지만 지하 심부 150m에 위치하는 것으로 모사하기 위해 모델링 지반의 상부에 약 2MPa의 응력을 가하였고, 공동은 연장방향 100m 모두 굴착한 것으로 해석하였다. 측압계수는 FISH 함수를 사용하여 1이 되도록 조건을 부여하였고, 상부를 제외한 나머지 단면은 모두 roller 조건을 부여하여 변위를 구속시켰다. Fig. 2.3은 장방형 공동을 굴착하였을 때, FLAC 3D에서의 모델링 지반 모습이다.

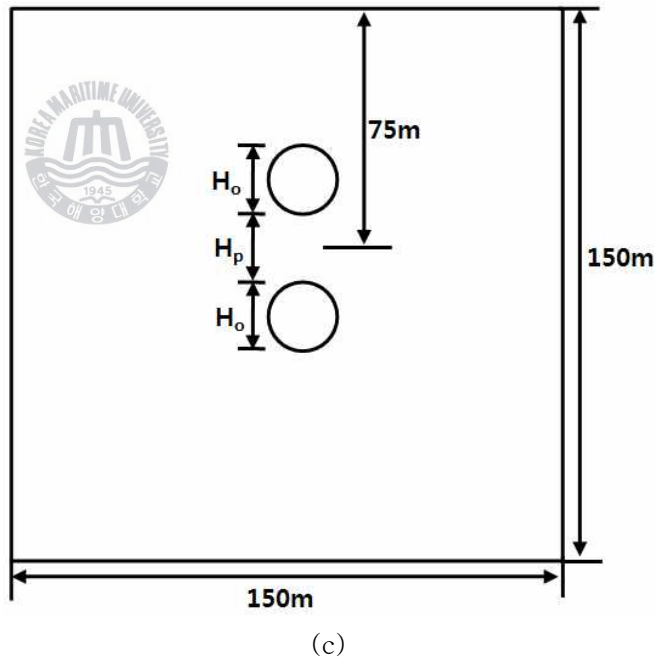
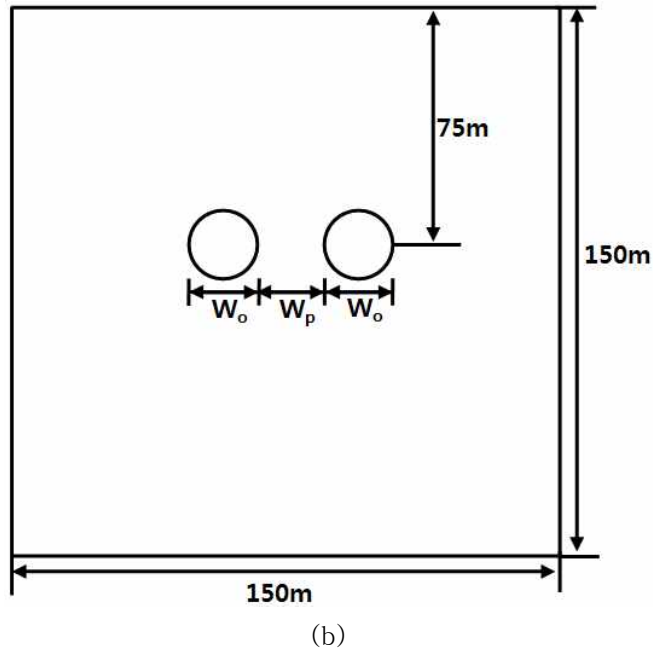
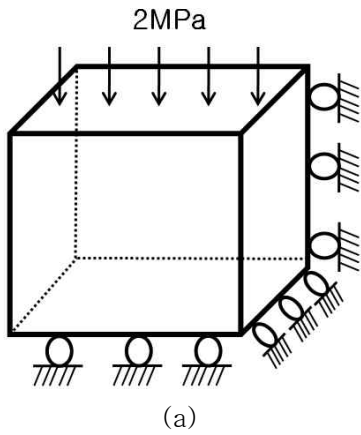


Fig. 2.2. Schematic layout for numerical model (a) boundary condition (b) vertical pillar (c) horizontal pillar(case1)

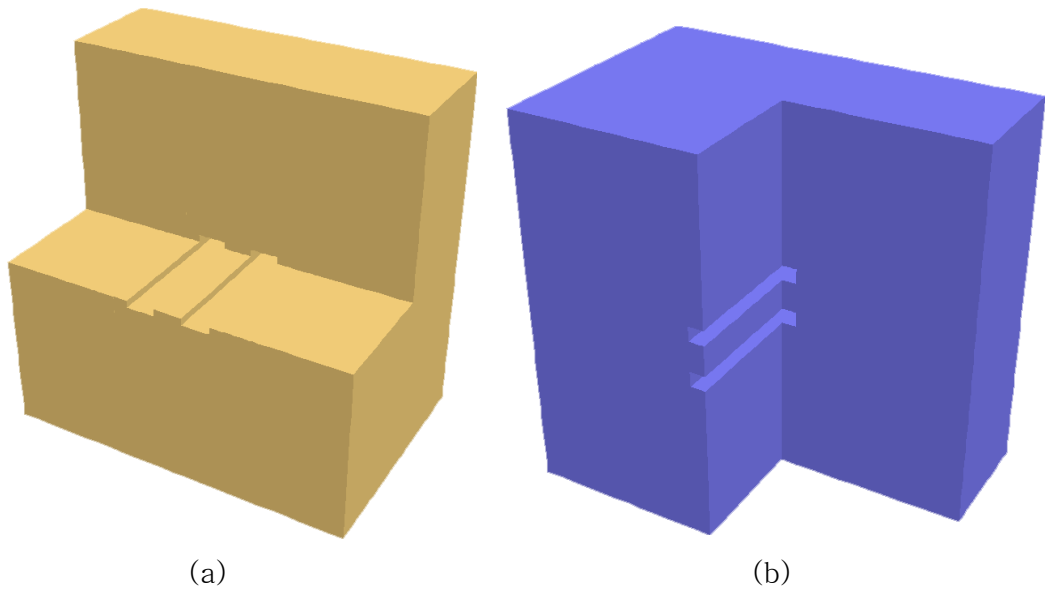


Fig. 2.3 Numerical modeling in FLAC 3D (a) vertical pillar (b) horizontal pillar(case3)

석회석 광맥과 주변 암반의 물성은 지역마다 다르지만 대부분 석회석 광맥과 모암이 경암에 속하며 물성치 또한 비슷하다고 알려져 있다. 따라서 입력변수로는 본 연구대상 광산을 대상으로 기존의 갱도 안정성 해석 연구를 위해 측정된 물성 및 역학적 특성값(선우춘 등, 2004)을 Table 2.4와 같이 적용하였다. FLAC 3D에 의한 해석은 모델링 기반을 안정시키고 공동을 굴착한 후 교란된 응력이 안정되도록 하였고, 그 기준은 Unbalanced Force 수치  $1.0^{-5}$  이하까지 해석을 실시하였다.

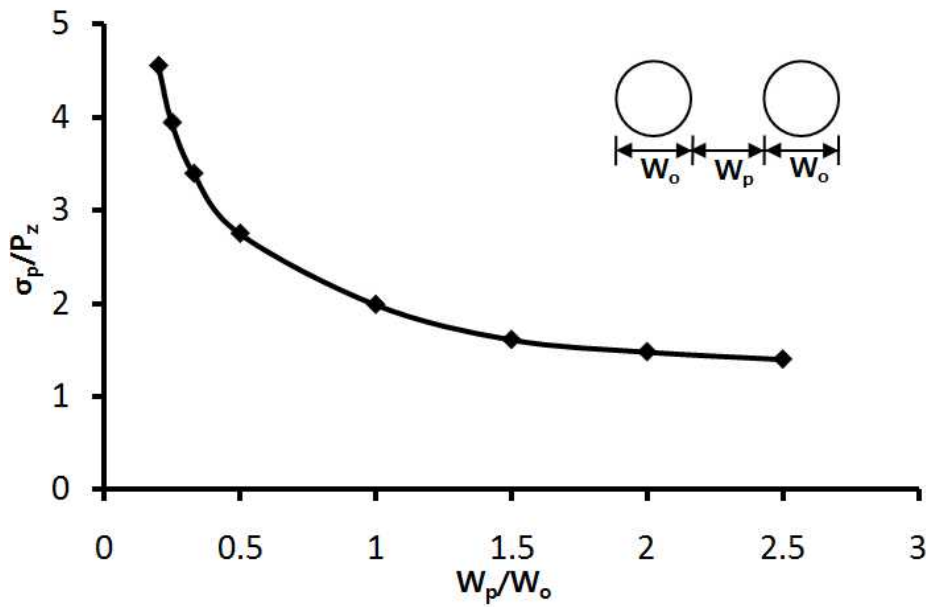
Table 2.4 Input parameter for the numerical model

Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Cohesion C(MPa)	Friction angle (°)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
9.0	7.0	1.0	35	2700

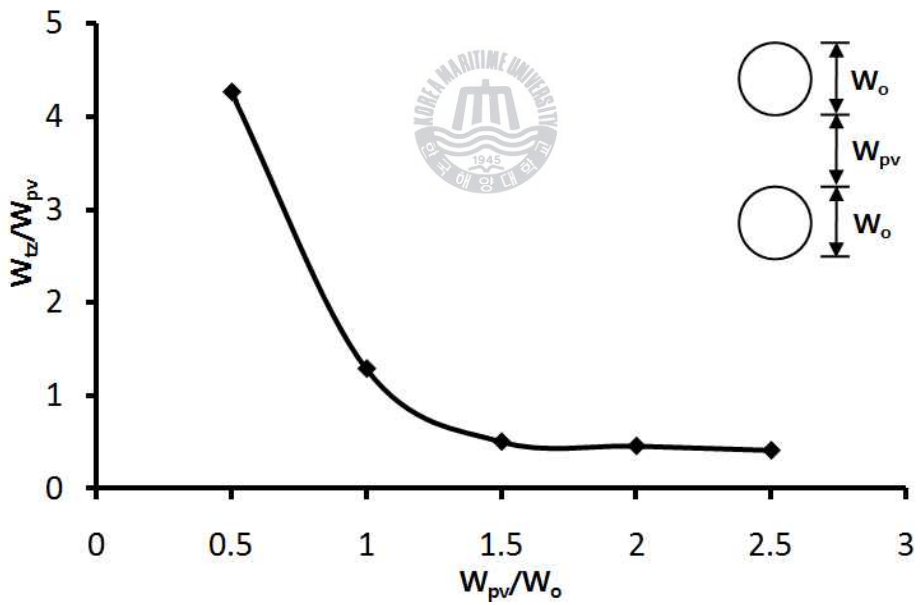
### 2.1.3 기존자료 검토

선우춘 등(2003)은 지반을 불연속체로 가정한 수치해석방법인 UDEC을 이용하여 각각 수직광주와 수평광주에 관하여 원형 갱도의 폭에 따른 갱도의 안정성에 관한 연구를 실시하였다. Fig. 2.2는 각각 광주의 수평폭과 수직폭의 크기에 따른 응력집중을 해석한 결과로서 수직광주나 수평광주 모두 광주의 폭이 공동의 폭보다 1.5배 이상이어야 작용하는 응력집중이 어느정도 수렴하는 것으로 발표하였다.





(a)



(b)

Fig 2.4 Concentrated stress of previous study (a) vertical pillar (b) horizontal pillar

## 2.1.4 응력 해석

본 논문에서는 지하 암반을 굴착할 경우 광주부분에 집중되는 응력을, 지반이 안정화되고 난 후의 초기응력( $P_z$ )에 대한 굴착 후 광주 중심에서의 응력( $\sigma$ ) 비율로 표시하였다. Table 2.5~Table 2.10은 Table 2.1의 채굴적 형상에 따른 수직광주와 수평광주에서의 응력성분으로 응력집중 방향을 확인하기 위하여 최대응력( $\sigma_{\max}$ ), 수직응력( $\sigma_v$ ), 수평응력( $\sigma_h$ )을 비교하였다. 그 결과 2개의 공동이 수평으로 평행하게 위치한 수직광주의 경우 수직응력이 최대 응력으로 작용을 하였고, 공동이 수직으로 위치하는 수평광주의 경우 수평응력이 최대 응력으로 작용하다가 일정한 광주 폭 이상에서는 다시 수직응력이 최대 응력으로 작용하였음을 알 수 있다.

Table 2.5. Concentrated stress of vertical pillar(case1)

$W_p/W_o$	Max. stress(MPa)			Vertical stress(MPa)			Horizontal stress(MPa)		
	$P_z$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}/P_z$	$\sigma_{v0}$	$\sigma_{v1}$	$\sigma_{v1}/\sigma_{v0}$	$\sigma_{h0}$	$\sigma_{h1}$	$\sigma_{h1}/\sigma_{h0}$
0.2	3.97	7.74	1.95	3.97	7.74	1.95	2.46	1.06	0.43
0.3	3.96	9.20	2.32	3.96	9.20	2.32	2.46	1.46	0.59
0.4	3.94	10.63	2.70	3.94	10.63	2.70	2.46	1.84	0.75
0.5	3.94	10.66	2.71	3.94	10.66	2.71	2.46	2.00	0.81
0.7	3.94	7.84	1.99	3.94	7.84	1.99	2.46	2.24	0.91
1	3.95	6.34	1.61	3.95	6.34	1.61	2.45	2.40	0.98
1.5	3.96	5.31	1.34	3.96	5.31	1.34	2.46	2.46	1.00
2	3.96	4.84	1.22	3.96	4.84	1.22	2.45	2.47	1.01
2.5	3.97	4.60	1.16	3.97	4.60	1.16	2.46	2.47	1.00
3	3.97	4.44	1.12	3.97	4.44	1.12	2.46	2.47	1.00
3.5	3.98	4.34	1.09	3.98	4.34	1.09	2.46	2.46	1.00
4	3.98	4.27	1.07	3.98	4.27	1.07	2.47	2.46	1.00

※  $\sigma_{v0}$ :초기수직응력,  $\sigma_{v1}$ :공동 굴착 후 수직응력

$\sigma_{h0}$ :초기수평응력,  $\sigma_{h1}$ :공동 굴착 후 수평응력



Table 2.6. Concentrated stress of vertical pillar(case2)

$W_p/W_o$	Max. stress(MPa)			Vertical stress(MPa)			Horizontal stress(MPa)		
	$P_z$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}/P_z$	$\sigma_{v0}$	$\sigma_{v1}$	$\sigma_{v1}/\sigma_{v0}$	$\sigma_{h0}$	$\sigma_{h1}$	$\sigma_{h1}/\sigma_{h0}$
0.2	3.98	4.25	1.07	3.98	4.25	1.07	2.42	0.11	0.05
0.3	3.98	4.59	1.15	3.98	4.59	1.15	2.42	0.20	0.08
0.4	3.98	5.26	1.32	3.98	5.26	1.32	2.42	0.38	0.16
0.5	3.98	6.15	1.55	3.98	6.15	1.55	2.42	0.63	0.26
0.7	3.98	8.11	2.04	3.98	8.11	2.04	2.42	1.17	0.48
1	3.98	7.65	1.92	3.98	7.65	1.92	2.42	1.45	0.60
1.5	3.98	5.95	1.49	3.98	5.95	1.49	2.42	1.82	0.75
2	3.98	5.25	1.32	3.98	5.25	1.32	2.41	2.05	0.85
2.5	3.98	4.89	1.23	3.98	4.89	1.23	2.41	2.18	0.90
3	3.98	4.66	1.17	3.98	4.66	1.17	2.41	2.26	0.94
3.5	3.98	4.51	1.13	3.98	4.51	1.13	2.41	2.29	0.95
4	3.98	4.41	1.11	3.98	4.41	1.11	2.41	2.32	0.96

Table 2.7. Concentrated stress of vertical pillar(case3)

$W_p/W_o$	Max. stress(MPa)			Vertical stress(MPa)			Horizontal stress(MPa)		
	$P_z$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}/P_z$	$\sigma_{v0}$	$\sigma_{v1}$	$\sigma_{v1}/\sigma_{v0}$	$\sigma_{h0}$	$\sigma_{h1}$	$\sigma_{h1}/\sigma_{h0}$
0.17	3.98	5.00	1.26	3.98	5.00	1.26	2.43	0.32	0.13
0.25	3.98	6.44	1.62	3.98	6.44	1.62	2.43	0.71	0.29
0.33	3.98	8.78	2.21	3.98	8.78	2.21	2.43	1.36	0.56
0.5	3.98	12.01	3.02	3.98	12.01	3.02	2.42	2.24	0.93
0.67	3.98	8.97	2.25	3.98	8.97	2.25	2.42	2.47	1.02
1	3.98	6.64	1.67	3.98	6.64	1.67	2.42	2.73	1.13
1.5	3.98	5.65	1.42	3.98	5.65	1.42	2.43	2.77	1.14
2	3.98	4.91	1.23	3.98	4.91	1.23	2.43	2.72	1.12
2.5	3.97	4.64	1.17	3.97	4.64	1.17	2.42	2.66	1.10
3	3.92	4.38	1.12	3.92	4.38	1.12	2.39	2.59	1.08
3.5	3.93	4.29	1.09	3.93	4.29	1.09	2.40	2.56	1.07
4	3.96	4.26	1.08	3.96	4.26	1.08	2.42	2.55	1.05

Table 2.8 Concentrated stress of horizontal pillar(case1)

$H_p/H_o$	Max. stress(MPa)			Vertical stress(MPa)			Horizontal stress(MPa)		
	$P_z$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}/P_z$	$\sigma_{v0}$	$\sigma_{v1}$	$\sigma_{v1}/\sigma_{v0}$	$\sigma_{h0}$	$\sigma_{h1}$	$\sigma_{h1}/\sigma_{h0}$
0.2	4.15	7.14	1.72	4.15	0.92	0.22	2.39	7.14	2.99
0.3	4.13	7.25	1.76	4.13	1.09	0.26	2.40	7.25	3.02
0.4	4.09	5.69	1.39	4.09	1.15	0.28	2.41	5.69	2.36
0.5	4.08	4.97	1.22	4.08	1.15	0.28	2.42	4.97	2.05
0.7	4.08	4.27	1.05	4.08	1.30	0.32	2.42	4.27	1.76
1	4.05	3.78	0.93	4.05	1.72	0.42	2.42	3.78	1.56
1.5	4.03	3.35	0.83	4.03	2.30	0.57	2.43	3.35	1.38
2	4.03	3.10	0.77	4.03	2.72	0.67	2.43	3.10	1.28
2.5	4.02	3.01	0.75	4.02	3.01	0.75	2.44	2.94	1.20
3	4.01	3.21	0.80	4.01	3.21	0.80	2.44	2.83	1.16
3.5	4.00	3.36	0.84	4.00	3.36	0.84	2.45	2.76	1.13
4.0	3.98	3.47	0.87	3.98	3.47	0.87	2.45	2.71	1.11

Table 2.9 Concentrated stress of horizontal pillar(case2)

$H_p/H_o$	Max. stress(MPa)			Vertical stress(MPa)			Horizontal stress(MPa)		
	$P_z$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}/P_z$	$\sigma_{v0}$	$\sigma_{v1}$	$\sigma_{v1}/\sigma_{v0}$	$\sigma_{h0}$	$\sigma_{h1}$	$\sigma_{h1}/\sigma_{h0}$
0.2	3.90	4.22	1.08	3.90	0.10	0.03	2.47	4.22	1.71
0.3	3.89	4.48	1.15	3.89	0.17	0.04	2.47	4.48	1.81
0.4	3.88	4.91	1.27	3.88	0.29	0.07	2.48	4.91	1.98
0.5	3.87	5.17	1.34	3.87	0.36	0.09	2.48	5.17	2.08
0.7	3.88	4.64	1.20	3.88	0.58	0.15	2.47	4.64	1.88
1	3.89	4.16	1.07	3.89	0.78	0.20	2.48	4.16	1.68
1.5	3.89	3.69	0.95	3.89	1.64	0.42	2.48	3.69	1.49
2	3.89	3.37	0.87	3.89	2.27	0.58	2.48	3.37	1.36
2.5	3.90	3.15	0.81	3.90	2.68	0.69	2.48	3.15	1.27
3	3.90	3.01	0.77	3.90	2.97	0.76	2.48	3.01	1.21
3.5	3.91	3.17	0.81	3.91	3.17	0.81	2.48	2.88	1.16
4.0	3.92	3.32	0.85	3.98	3.47	0.87	2.45	2.71	1.11

Table 2.10 Concentrated stress of horizontal pillar(case3)

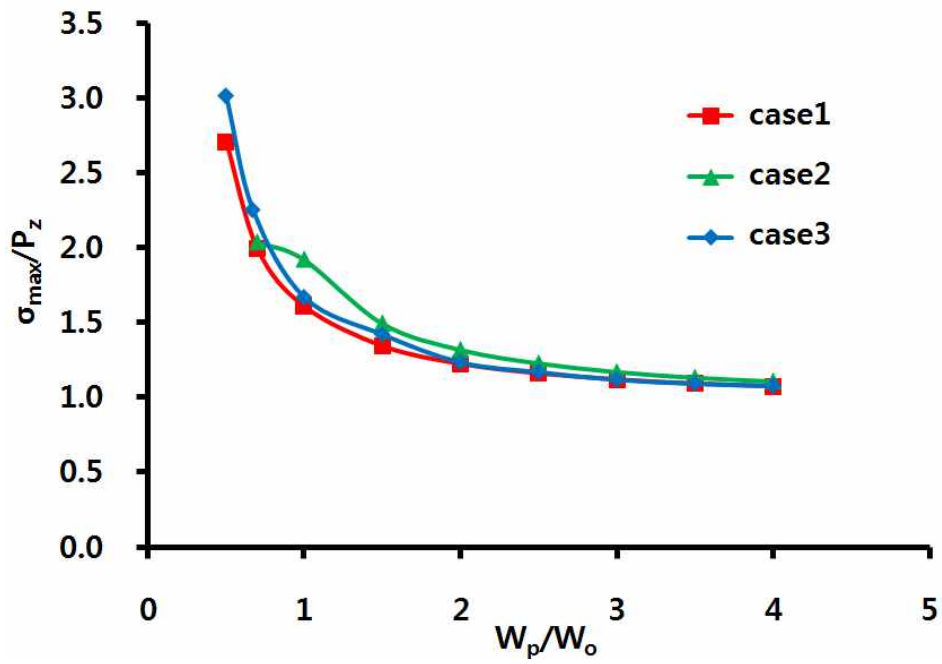
$H_p/H_o$	Max. stress(MPa)			Vertical stress(MPa)			Horizontal stress(MPa)		
	$P_z$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\max}/P_z$	$\sigma_{v0}$	$\sigma_{v1}$	$\sigma_{v1}/\sigma_{v0}$	$\sigma_{h0}$	$\sigma_{h1}$	$\sigma_{h1}/\sigma_{h0}$
0.33	3.94	3.85	0.98	3.94	0.04	0.01	2.45	3.85	1.57
0.5	3.94	4.09	1.04	3.94	0.10	0.03	2.45	4.09	1.67
0.67	3.94	4.26	1.08	3.94	0.21	0.05	2.45	4.26	1.74
1	3.94	3.97	1.01	3.94	0.35	0.09	2.45	3.97	1.62
1.33	3.94	3.74	0.95	3.94	0.44	0.11	2.45	3.74	1.53
1.5	3.94	3.62	0.92	3.94	0.43	0.11	2.45	3.62	1.48
2	3.94	3.41	0.87	3.94	0.21	0.05	2.45	3.41	1.39
2.5	3.94	3.42	0.87	3.94	0.75	0.19	2.44	3.42	1.40
3	3.95	3.33	0.84	3.95	1.27	0.32	2.44	3.33	1.36
3.5	3.95	3.26	0.83	3.95	1.57	0.40	2.44	3.26	1.34
4	3.95	3.17	0.80	3.95	1.89	0.48	2.44	3.17	1.30



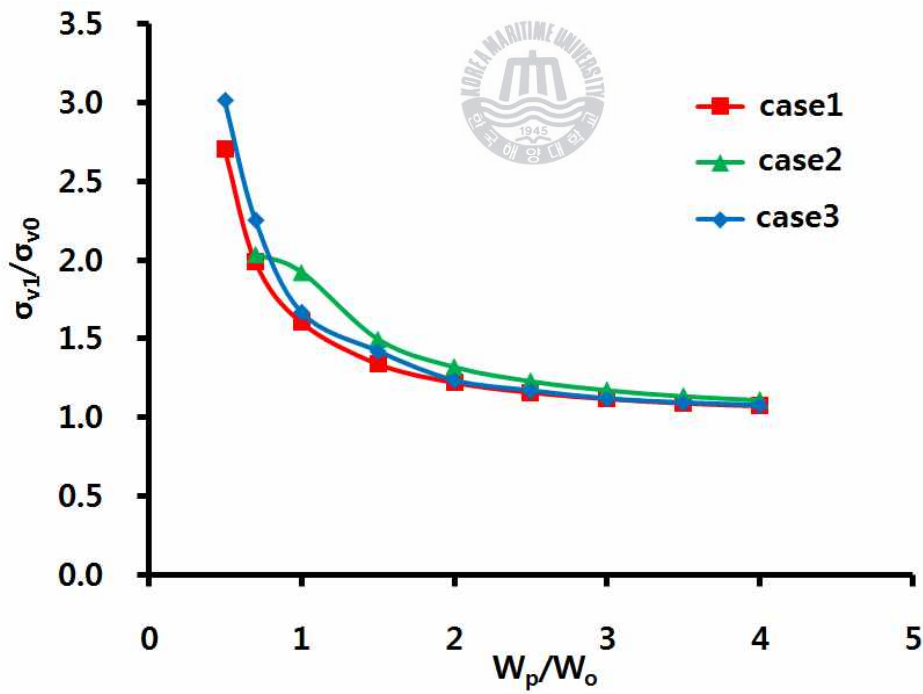
Fig. 2.5는 수직광주에서의 최대주응력 및 수직응력과 수평응력으로, 수직광주에서는 수직응력이 최대주응력으로 작용하여 최대주응력, 수직응력의 발생양상은 동일하게 나타났다. 최대 주응력으로 작용하는 수직응력의 응력집중은 Fig. 2.5(b)에서와 같이 세 가지 공동 형상 모두 공동의 폭에 대한 광주의 폭이 1.5 이상이 되어야 완만하게 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 2.6~Fig. 2.8은 공동의 형상에 따라 각각 응력집중이 크게 작용하는 공동의 폭에 대한 광주 폭 및 공동의 폭에 대한 광주의 폭을 1.5배로 하였을 때의 주응력분포이다. 광주의 폭이 작은 경우에는 공동 굴착으로 인해 광주에 응력이 집중되었지만, 공동 폭에 대한 광주 폭을 1.5배로 하였을 경우에는 광주에서 응력집중이 해소된 것으로 나타난다.

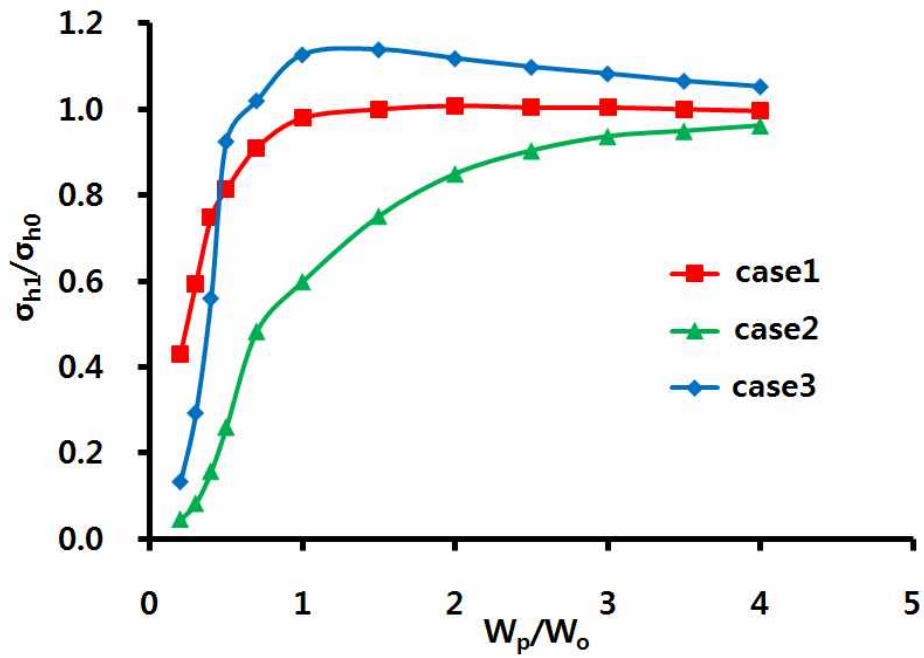
Fig. 2.5(c)의 수평응력은 원형의 경우 공동의 폭에 대한 광주의 폭이 1에서 초기수평응력을 회복하였고, 정방형의 경우 초기수평응력이 공동의 폭에 대한 광주의 폭이 4 이상이 되어야 회복될 것으로 보인다. 이는 Fig. 2.7에서 보듯이 정방형 공동의 모서리에서 응력이 집중되어 응력이 원활하게 분포하지 못한 것으로 사료된다. 장방형은 0.67에서 초기수평응력을 회복 후에 다소 크게 나타났다지만, Fig. 2.8에서 보듯이 정방형 공동에서와 같은 모서리에서의 응력 집중은 크게 나타나지 않았다. 이는 공동의 형상비에 의한 효과로 사료되지만 명확한 해석을 위해서는 여러 형상비에 따른 연구 및 현장 계측이 추가로 필요할 것으로 사료된다.



(a)

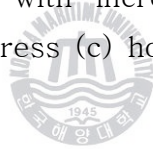


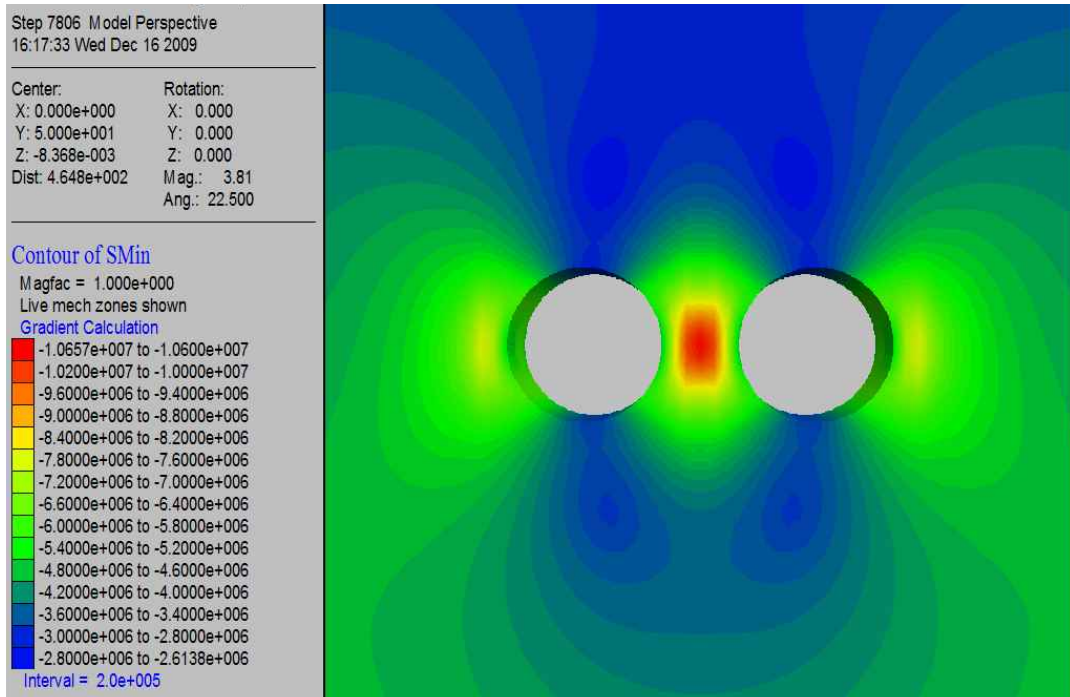
(b)



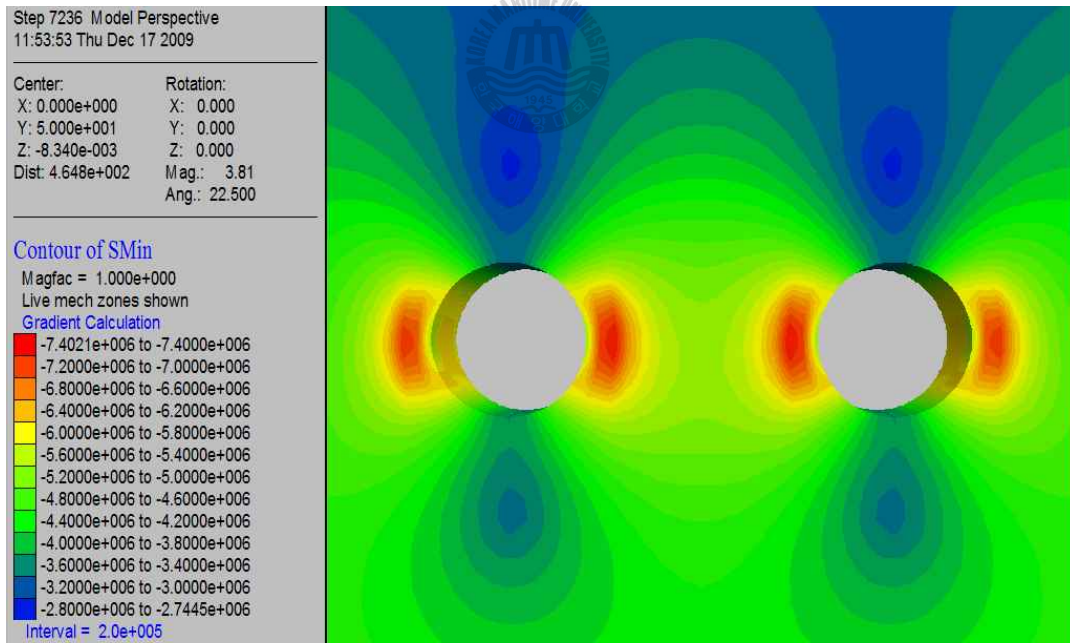
(c)

Fig. 2.5 Concentrated stress with increasing vertical pillar width (a) Maximum stress (b) vertical stress (c) horizontal stress





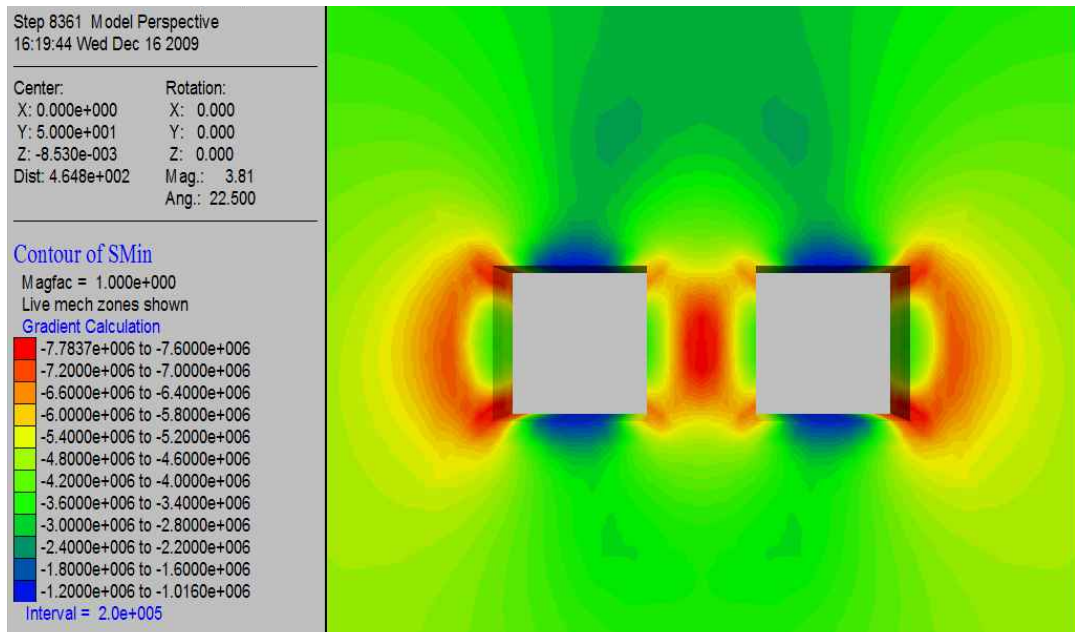
(a)



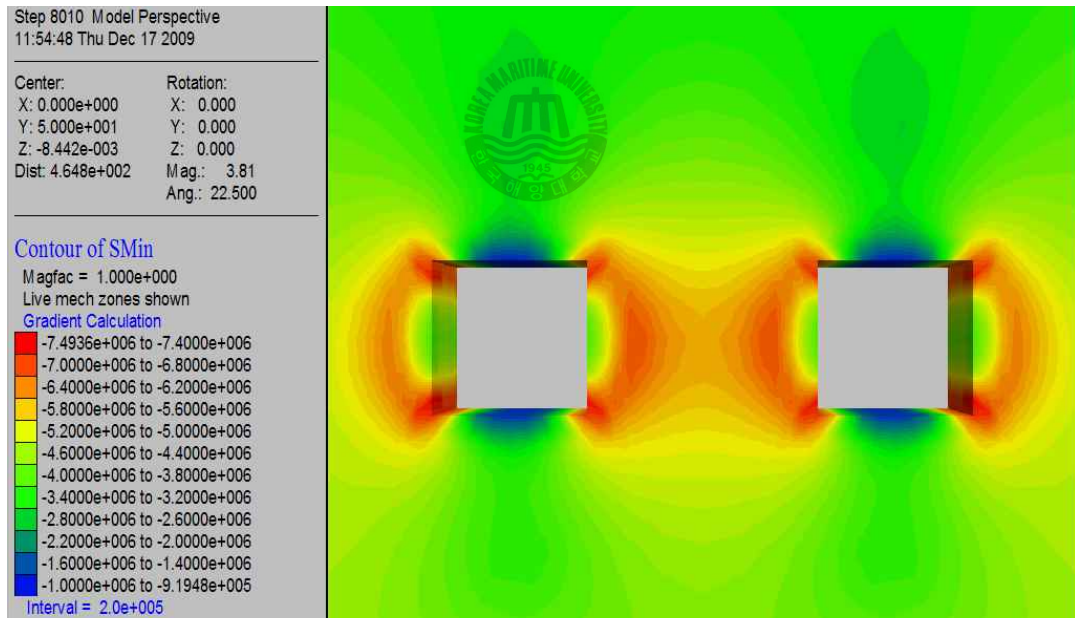
(b)

Fig. 2.6 Maximum stress distribution of vertical pillar(case1) (a)  $W_p/W_o=5m$  (b)  $W_p/W_o=15m$





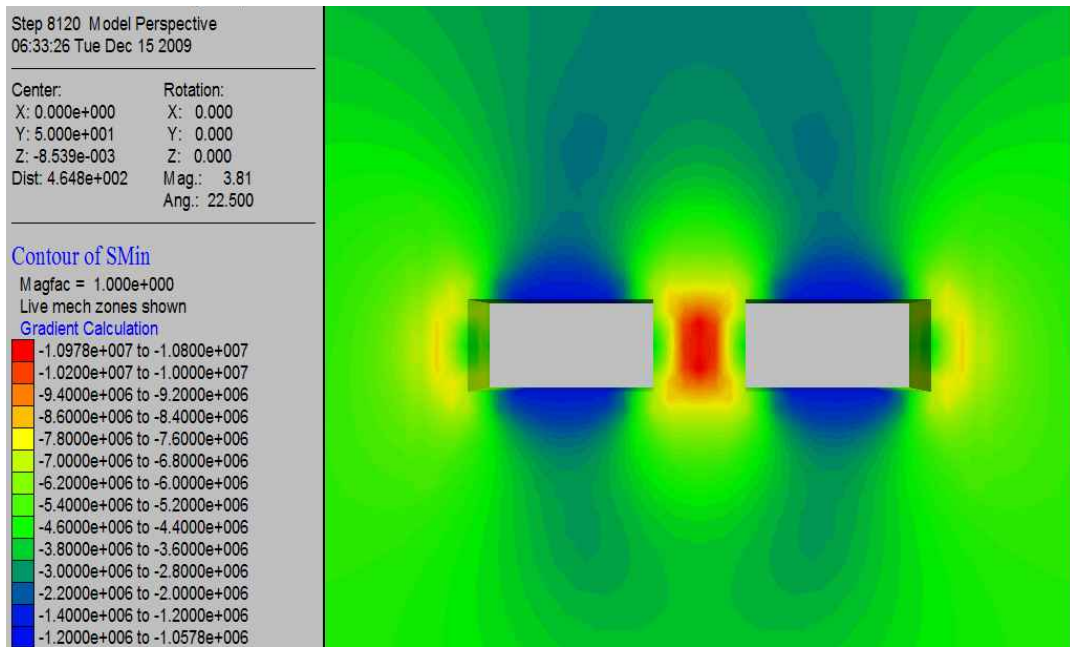
(a)



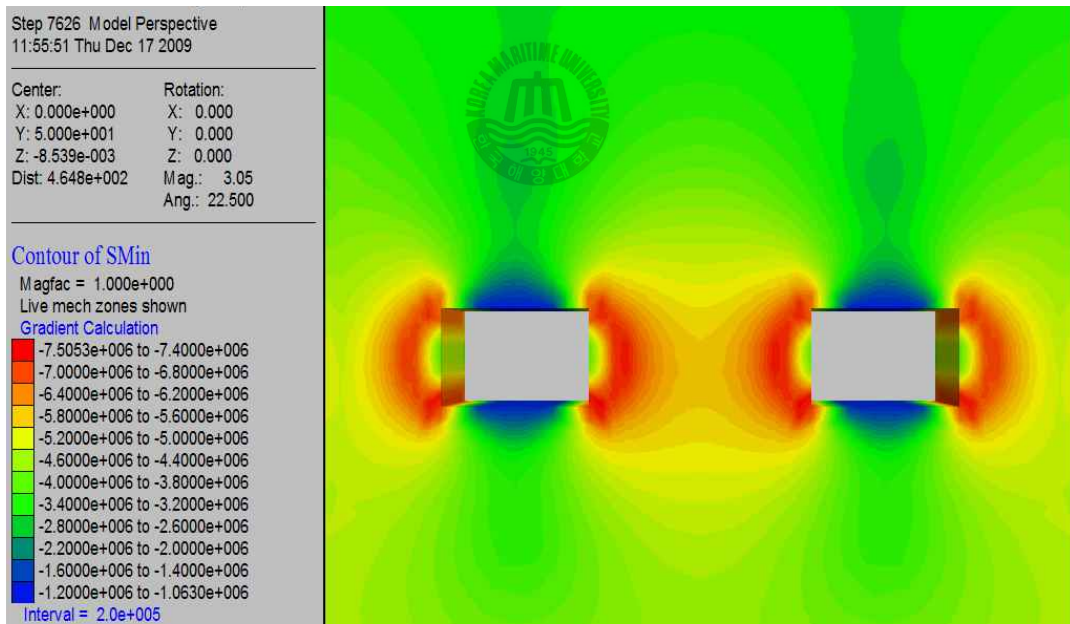
(b)

Fig. 2.7 Maximum stress distribution of vertical pillar(case2) (a)  $W_p/W_o=7m$  (b)  $W_p/W_o=15m$





(a)



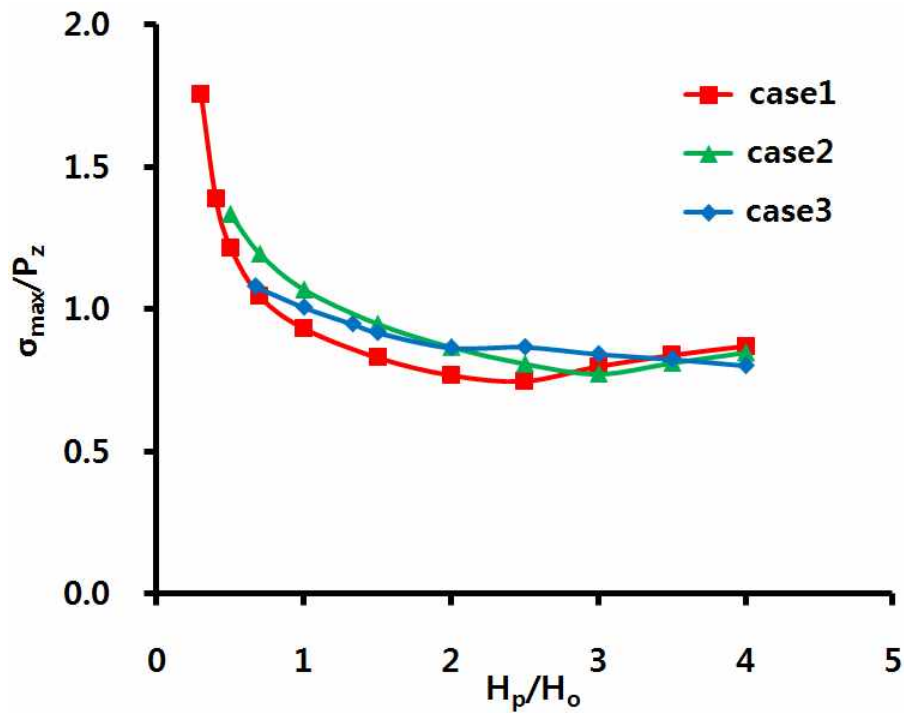
(b)

Fig. 2.8 Maximum stress distribution of vertical pillar(case3) (a)  $W_p/W_o=6m$  (b)  $W_p/W_o=18m$

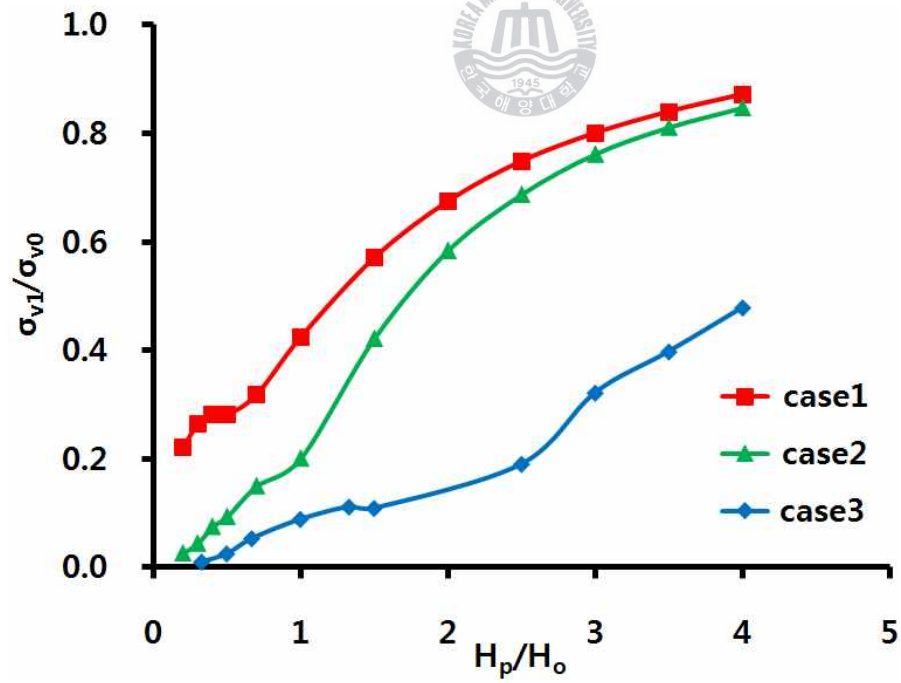
Fig. 2.9는 수평광주에서 최대주응력 및 수직응력과 수평응력으로 수평응력이 최대주응력으로 작용하지만, Fig. 2.9(a)에서 보듯이 원형과 정방형의 경우 공동의 폭에 대한 광주의 폭이 2.5 이상에서는 수직응력이 최대주응력으로 작용한다. 최대 주응력으로 작용하는 수평응력의 응력집중은 2.9(c)에서와 같이 세 가지 공동 형상 모두 공동의 폭에 대한 광주의 폭이 1.5 이상이 되어야 완만하게 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 2.10~Fig. 2.12는 공동의 형상에 따라 각각 응력집중이 크게 작용하는 광주 높이와 공동의 높이에 대한 광주의 높이를 1.5배로 하였을 때의 수평응력 분포이다. 수직광주에서와 마찬가지로 광주의 높이가 작은 경우에는 공동 굴착으로 인해 광주에 응력이 집중되었지만, 공동 높이에 대한 광주 높이를 1.5배로 하였을 경우에는 광주에서 응력집중이 해소된 것으로 나타난다.

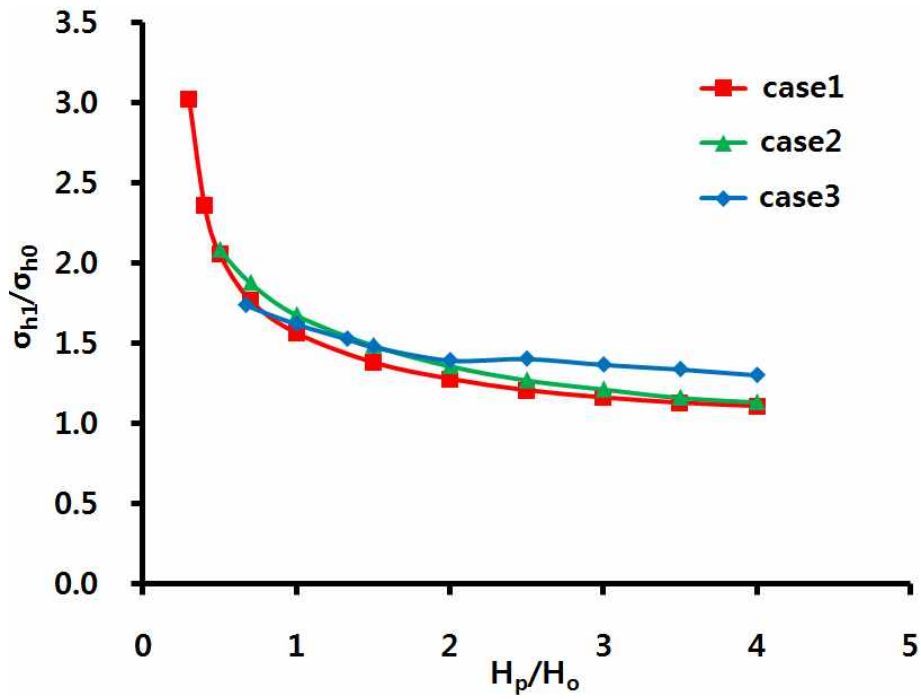
Fig. 2.9(b)의 수직응력은 광주의 높이가 커질수록 초기수직응력으로 원형, 정방형, 장방형 순으로 회복하고 있다. 이것은 Fig. 2.11과 Fig. 2.12에서 보듯이 정방형과 장방형의 경우 모서리에서 응력이 집중되어 원활하게 분포되지 못한 것으로 사료된다. 특히 장방형의 경우 원형과 정방형에 비해 초기응력으로의 회복이 잘 이루어지지 않고 있다. 이는 공동의 높이에 대한 폭이 2배인 장방형의 형상비에 의한 효과로 추측되지만 수직광주에서와 마찬가지로 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.



(a)

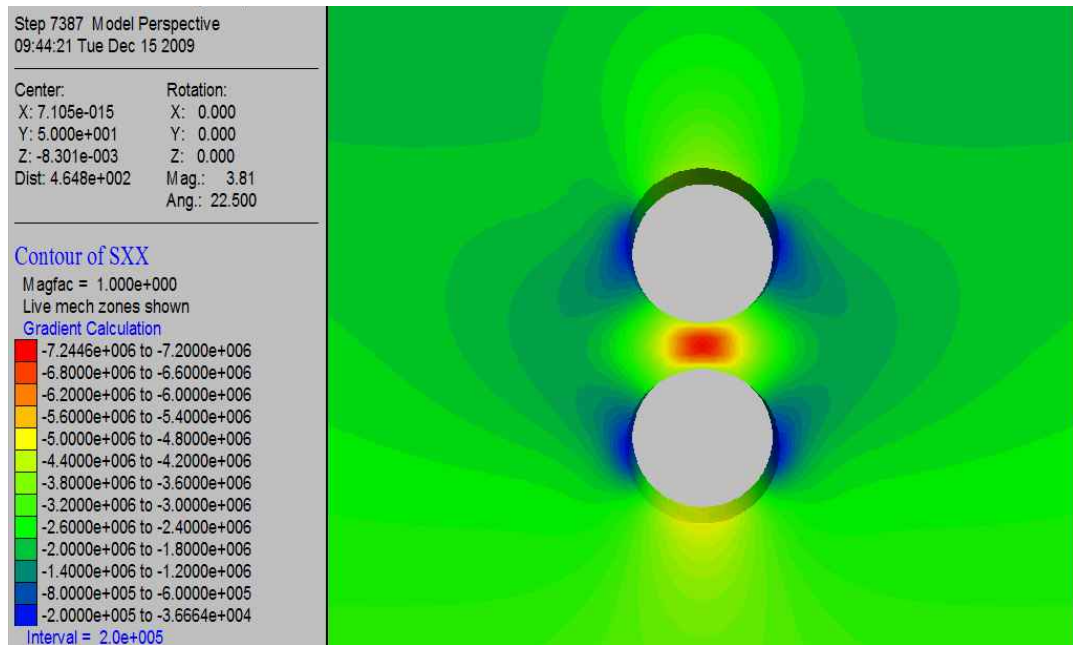


(b)

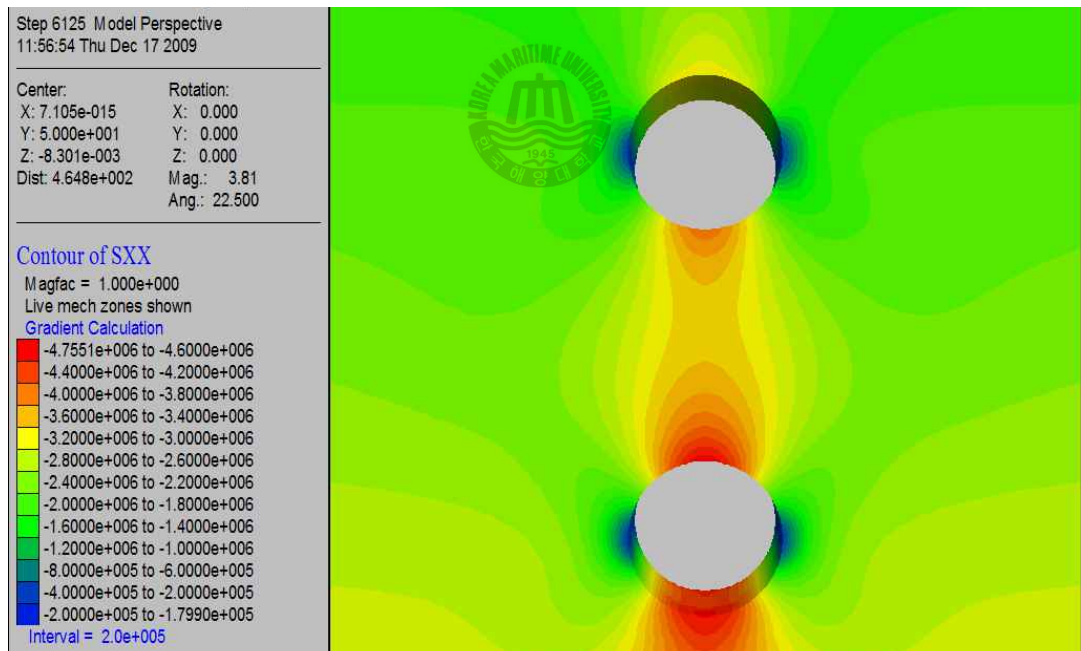


(c)

Fig. 2.9 Concentrated stress with increasing horizontal pillar height (a) maximum stress (b) vertical stress (c) horizontal stress

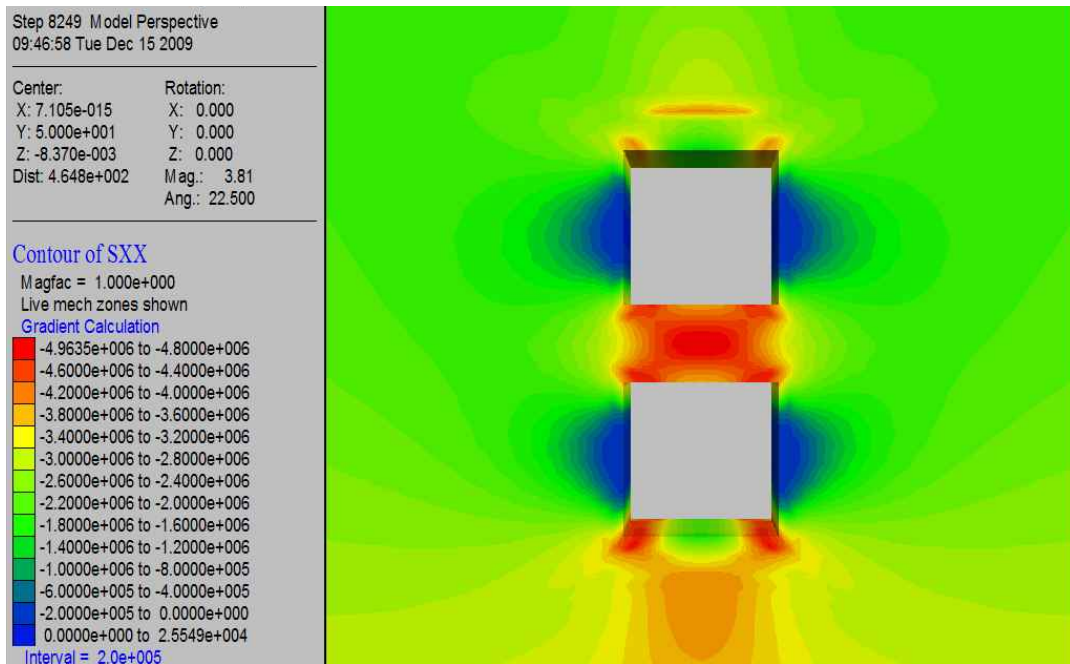


(a)

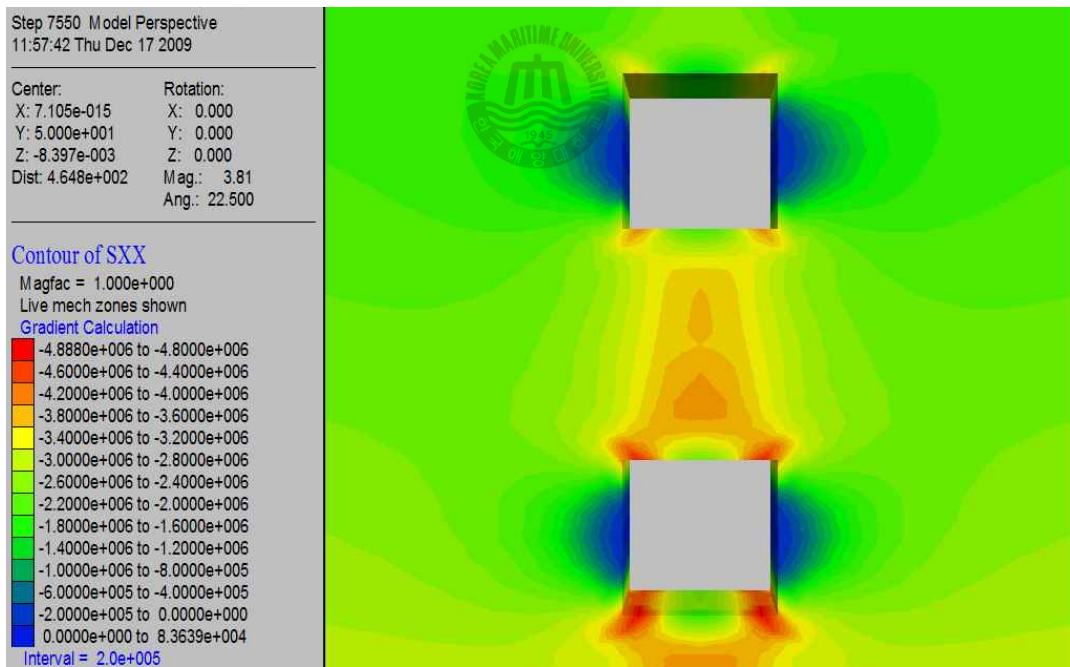


(b)

Fig. 2.10 Horizontal stress distribution of horizontal pillar(case1) (a)  $H_p/H_o=3m$  (b)  $H_p/H_o=15m$



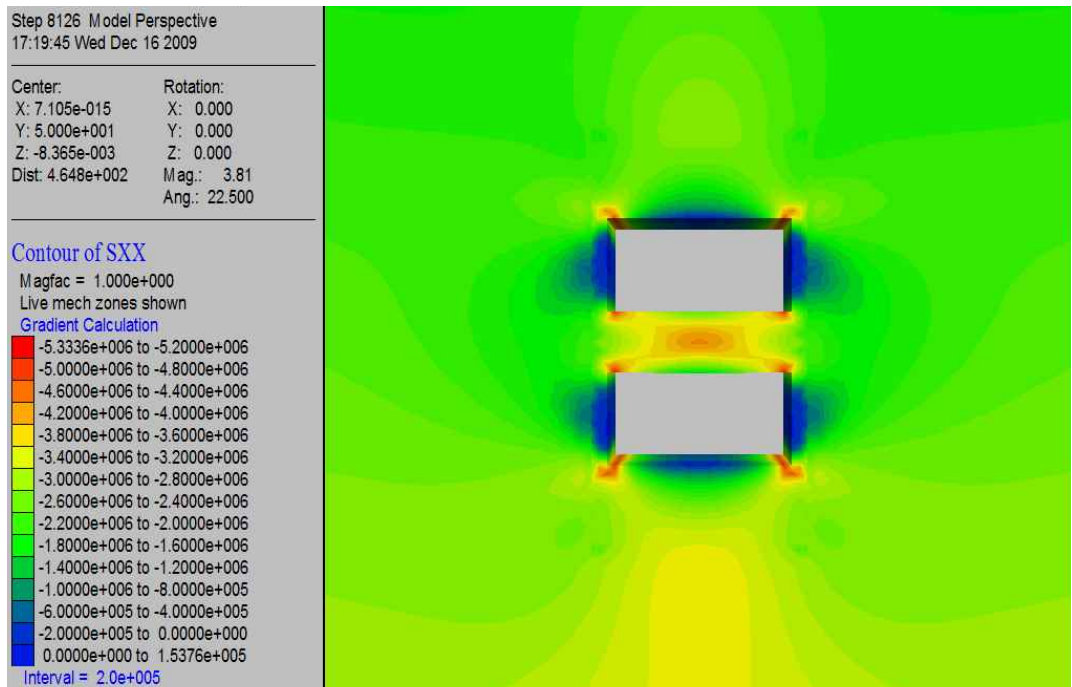
(a)



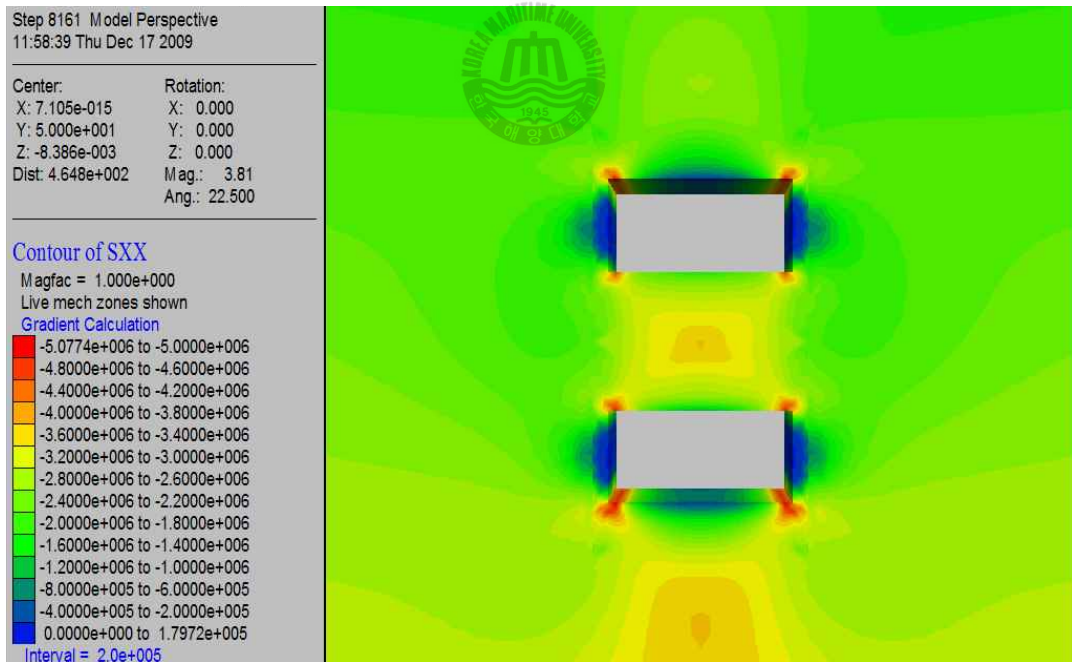
(b)

Fig. 2.11 Horizontal stress distribution of horizontal pillar(case2) (a)  $H_p/H_o=5m$  (b)  $H_p/H_o=15m$





(a)



(b)

Fig. 2.12 Horizontal stress distribution of horizontal pillar(case3) (a)  $H_p/H_o=4m$  (b)  $H_p/H_o=9m$

이상의 결과로 공동 폭과 높이에 대한 광주의 폭과 높이는 기존연구와 동일하게 1.5 이상이 되어야 하며, 이는 공동 형상과 크게 상관이 없었다. 하지만 모서리에서 응력이 집중되는 정방형에 비해 원형이 더 안정적인 응력분포가 나타나, 갯도의 안전에는 원형이 더 유리하다는 이론과 일치한다. 장방형의 경우 공동이 수평으로 나란한 경우 모서리에서의 응력 집중이 잘 나타나지 않았지만, 공동이 수직으로 나란한 경우 모서리에서의 응력 집중이 나타났다. 이는 장방형의 형상비에 의한 영향으로 추측되나 명확한 해석을 위해서는 여러 형상비에 대한 연구와 현장 계측이 추가로 필요할 것으로 사료된다.





## 2.2 광주 회수 계획 검토

원지반에서 채굴에 의해 공동이 형성되었을 때 암반 내에는 응력변화에 따라 변위가 발생하게 되고, 과도한 채굴에 따른 대공동의 채굴적을 형성할 경우에는 채굴조건, 채굴심도, 상반의 강도와 같은 지하 채굴공동 주위의 지질조건에 따라 지표침하를 발생시킬 수 있다. 특히 최근 들어 석회석 광산의 갱내 채광장의 규모가 대형화, 복잡화됨에 따라 싱크홀과 같은 침하의 발생 가능성이 상대적으로 높아지고 있는데, 이와 같은 지표침하를 방지할 수 있는 방법이 적당한 규격의 보안광주를 남기는 것이다(선우춘 등, 2005).

연구대상광산인 제천시역 A 석회석 광산은 2009년 현재에는 8개 중단이 굴착된 상태로 중단 폭은 약 20m, 높이 10m로 단 사이의 간격은 15m를 두고 굴착되어, 폭 20m, 높이 15m의 7개 수평광주가 형성되었다. 광주의 높이와 중단 높이의 비는 1.5배이다. 추후 7개 광주 모두 회수할 경우, 높이 수십m, 연장 수백m의 거대 공동이 발생하여 광산의 안전에 문제가 발생할 수 있으므로 적절한 채광계획에 관한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 먼저 광주의 회수 방향에 대해 검토하였고, 광주를 2개씩 및 3개씩 회수 할 경우에 대해 검토하였다.



### 2.2.1 측압계수 결정

측압계수( $K$ )는 자연상태에서 지하 암반이 작용하는 초기응력 중에서 연직방향 응력( $\sigma_v$ )에 대한 수평방향 응력( $\sigma_h$ )의 비로 식(2.2)과 같이 계산된다.

$$K = \sigma_h / \sigma_v \quad (2.2)$$

초기응력의 상태에 따라 암반 굴착의 규모, 방향, 형태 등의 결정이 영향을 받을 수 있기 때문에 지하 암반 구조물 안정성 분석에 있어서 초기응력은 선행적으로 규명되어야 한다. 하지만 초기응력은 물리량이 가시적이지 않아 직접 측정하기 어려우므로, 본 논문에서는 간접적으로 연직응력과 수평응력을 계산하여 측압계수를 구하는 방법을 사용하였다(임한옥, 2005).

임한옥과 이정인이 제안한 국내 0~850m 심도에 따른 응력성분 변화에 대한 식(2.3)과 식(2.4)를 사용하여 모델링 지반 약 100~300m의 응력을 구하여 식(2.2)로 계산한 결과 측압계수는 약 1로 계산되었다.

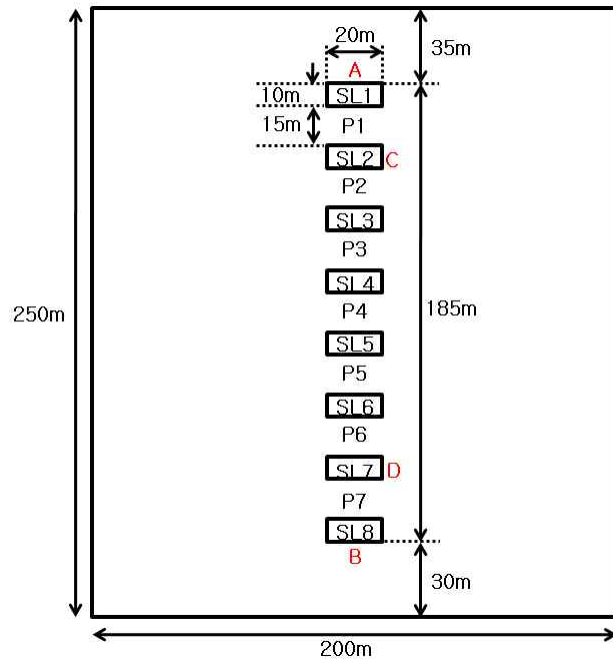
$$\sigma_v = 0.233 + 0.0224z \quad (2.3)$$

$$\sigma_{Ha} = 1.858 + 0.018z \quad (2.4)$$

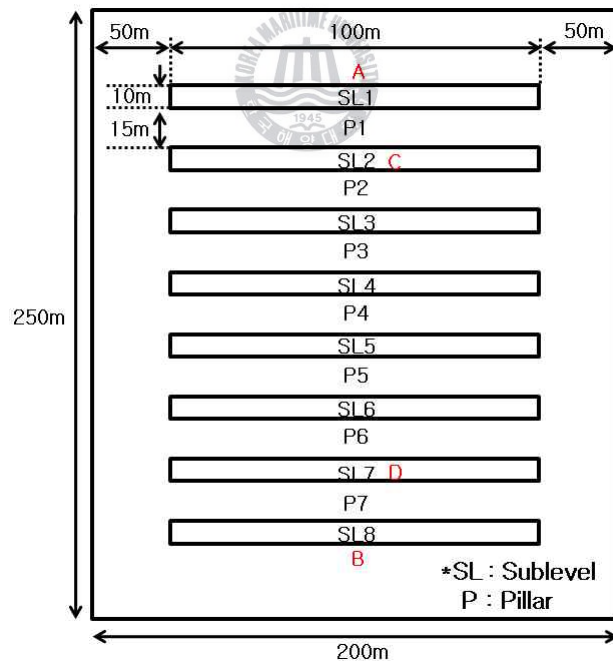
## 2.2.2 지반모델링

지반은 Fig. 2.13과 같이  $200\text{m} \times 200\text{m} \times 250\text{m}$ (가로×세로×높이), 광맥의 경사는  $90^\circ$ 로 모델링하고, 현장에서와 같이 폭 20m, 높이 10m인 중단을 높이의 1.5배인 15m 간격으로 8중단까지 굴착하였다. 지표와 모델링 지반 상부까지의 수직거리는 75m이고, 따라서 상부에 2MPa의 응력을 가하고 나머지 단면은 모두 roller 조건으로 변위를 구속시켰으며 축압계수는 1이 되도록 하였다. 지반의 요소 수는 162,000개이며 1~8중단을 순서대로 선 굴착하였다. Fig. 2.14는 FLAC 3D에서의 모델링 지반이다.





(a)



(b)

Fig. 2.13 Schematic layout for numerical model (a) a front view (b) a side view

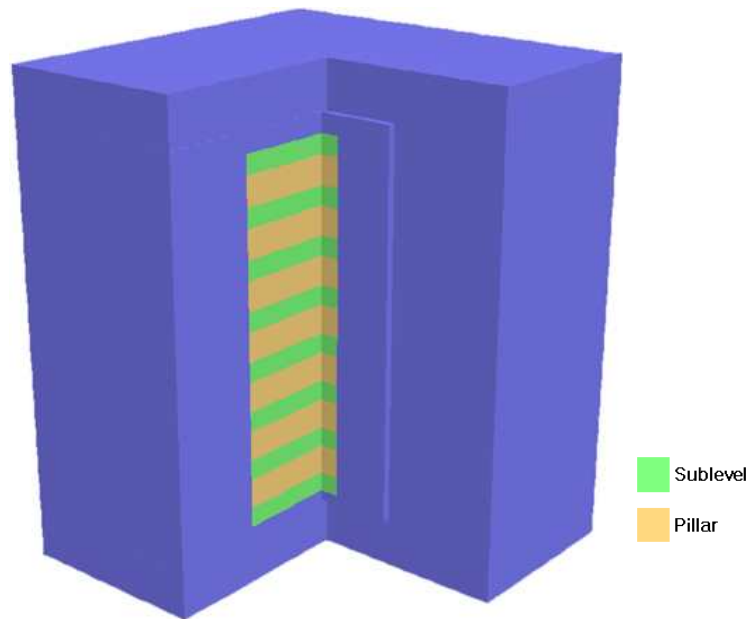


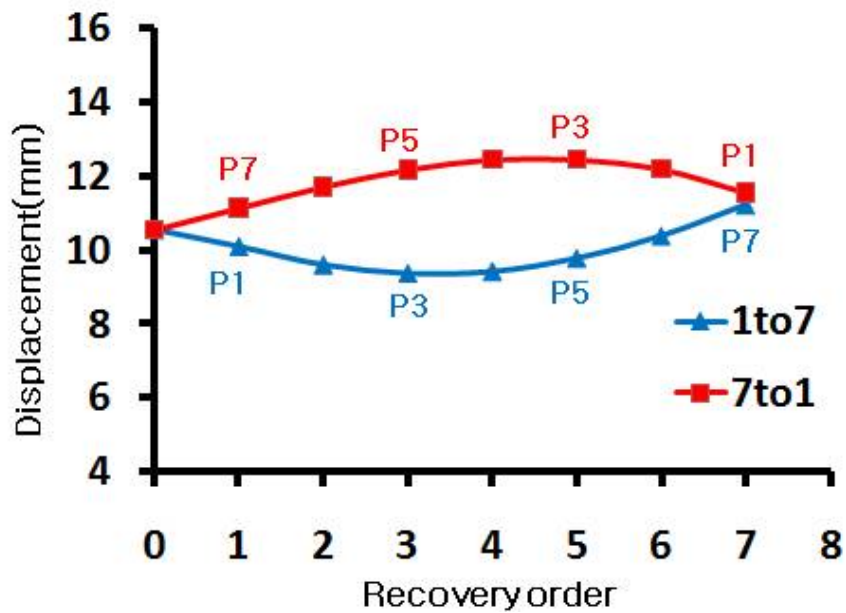
Fig. 2.14 Numerical modeling in FLAC 3D



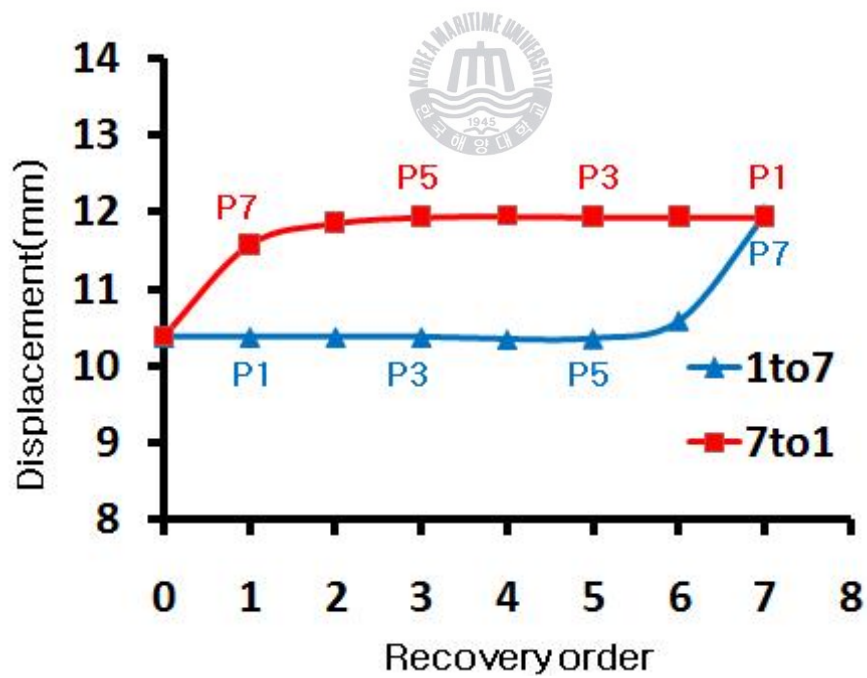
### 2.2.3 회수 방향에 따른 해석

중단채광법은 중단이 천공 및 운반 작업장이 되므로 그 상·하부 광주 및 측벽의 안전이 무엇보다 중요하다. 작업장의 안전에 유리한 광주의 회수방향을 검토하기 위해 상부에서 하부( $P1 \rightarrow P7$ ), 하부에서 상부( $P7 \rightarrow P1$ ) 방향으로 7개 수평광주를 모두 회수함에 따라 지반 변위와 소성영역을 해석하였다. Fig. 2.15는 각각 Fig. 2.13의 천정부(A), 바닥부(B), 중단2 측벽(C), 중단7 측벽(D)에서의 수직변위(A, B) 및 내공변위(C, D)를 나타낸 것이다. 바닥부나 측벽부에서는 광주의 회수 방향과 상관없이 2단계 전의 광주가 회수되는 시점부터 변위가 발생하여 측점 인근 광주가 회수됨에 따라 최종변위에 도달한다. 천정부는 최종 광주 회수 전까지는 하부에서 상부방향으로의 채광에 수직변위가 더 크게 발생한다. 광주에서의 수직변위도 상부광주는 하부광주의 채광에 변위가 발생하는 반면, 하부광주는 상부광주의 채광에는 크게 변위가 발생하지 않았다. 또한 천정부나 바닥에서의 회수 방향에 따른 변위 차이에 비해 측벽부에서는 4~7배 이상 크게 나타나 회수 방향에 따른 측벽부에서의 변위 발생이 중요함을 알 수 있다.

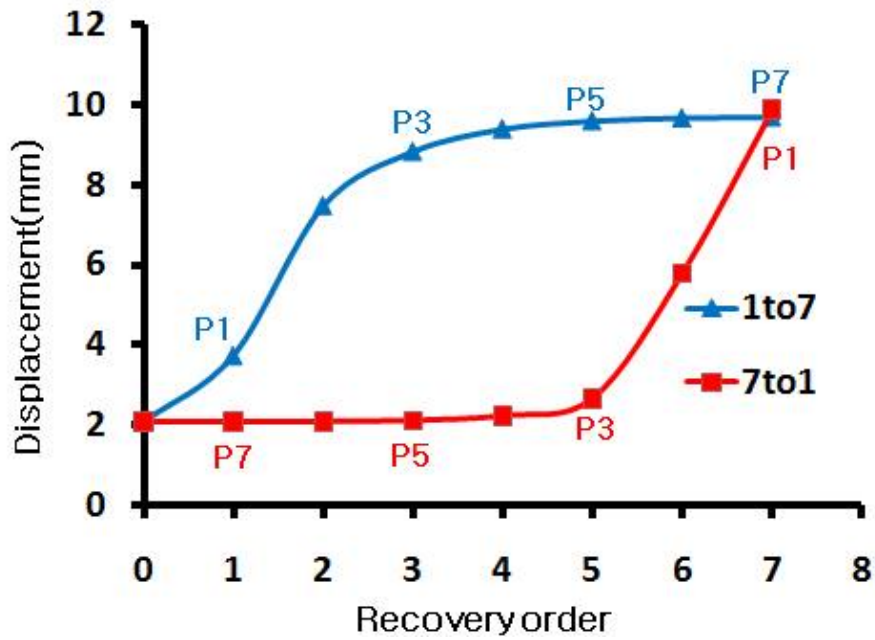
하부광주의 채광에 상부지반이 불안정해지는 현상은 Fig. 2.16에서와 같이 회수중반부터 하부에서 상부방향 회수시 소성영역이 더 넓게 분포하기 시작해서 최종적으로는 훨씬 많은 영역에서 나타나고 있다. 따라서 회수는 상부에서 하부로 하는 것이 더 바람직하며, 연속된 여러 광주 회수할 경우 하부보다는 상부에서 이루어져야 한다.



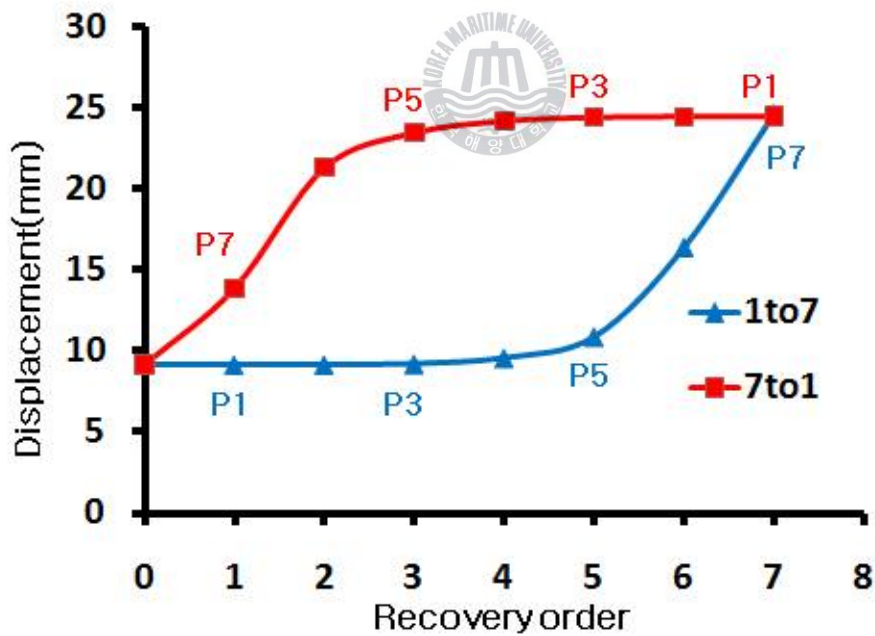
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2.15 Displacement versus recovery directions(P1 to P7 and P7 to P1) (a) crown(A) (b) bottom(B) (c) lateral wall(C) (d) lateral wall(D)



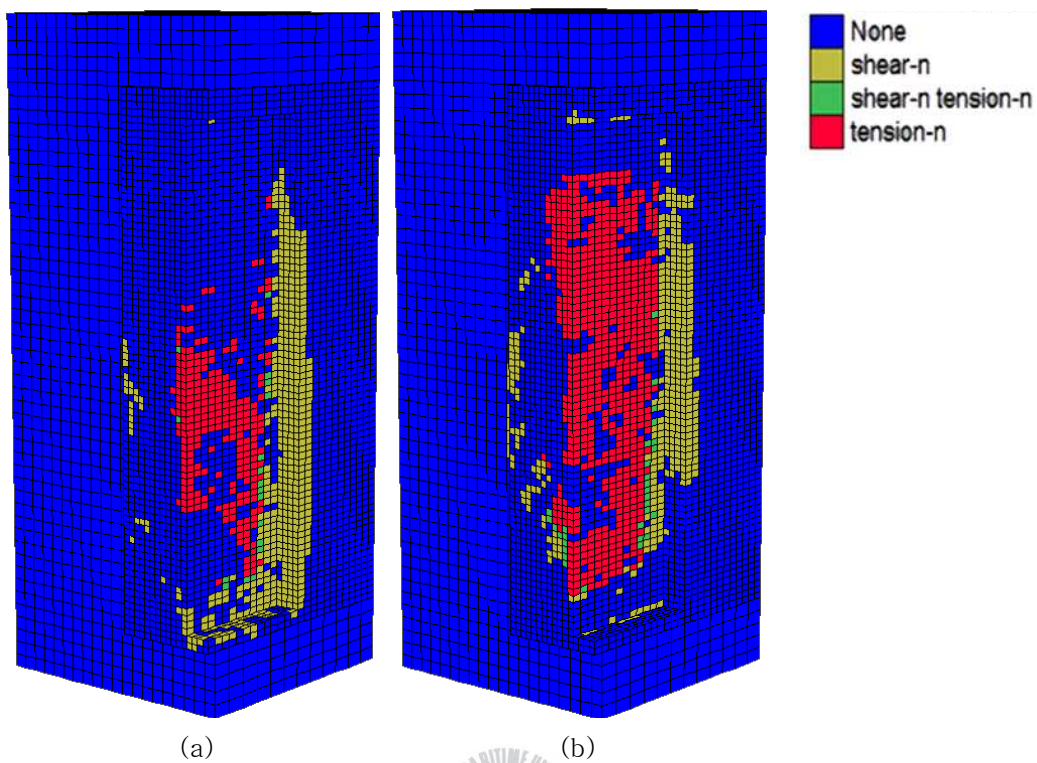
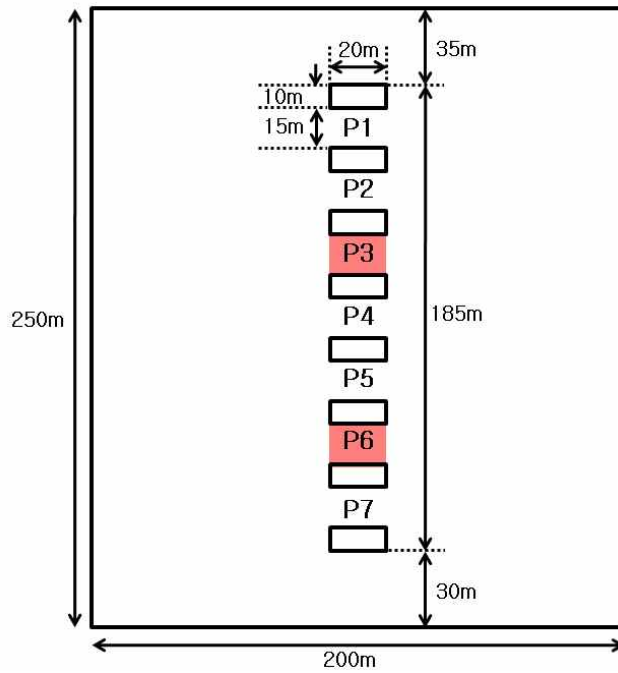


Fig. 2.16 Plasticity state relating to recovery directions (a) recovery from P1 to P7 (b) recovery from P7 to P1

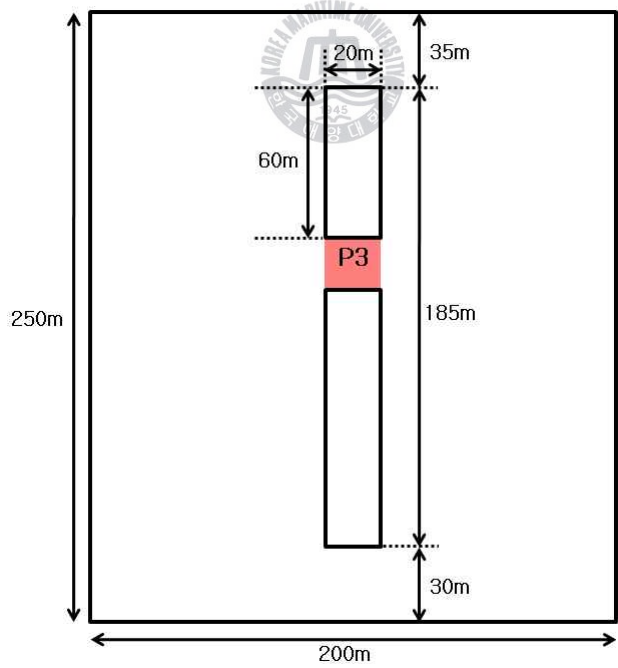
#### 2.2.4 2개 및 3개 광주 연속 회수

7개 광주를 모두 회수할 경우 Fig. 2.16의 (a), (b)에서와 같이 넓은 면적에서 소성영역이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 보안광주를 제외하고 광주를 2개씩, 3개씩 연속으로 회수할 경우에 대해 해석을 실시하였다. Fig. 2.17에서 보듯이 2개 광주 연속 회수는 보안광주로 P3와 P6를 남겨 두고 순서대로 광주 회수를 실시하였고, 3개 광주 연속 회수는 P4를 남겨두고 순서대로 광주 회수를 실시하였다.





(a)



(b)

Fig. 2.17 Schematic layout of remaining pillars (a) two pillars (b) three pillars

Table 2.11은 연속 회수시에 광주에서의 응력으로 모두 7.4~ 7.7MPa의 높은 응력이 집중됨을 알 수 있다.

Table 2.11 Induced stresses in pillar by the recovery plan

	two pillars		three pillars
remaining pillar number	P3	P6	P4
initial stress(MPa)	3.20	5.22	3.87
stoping of sublevel(MPa)	5.59	7.19	6.52
recovery of pillar(MPa)	7.44	7.68	7.69

Fig. 2.18은 모두 회수했을 때와 보안광주를 남기고 2개 광주, 3개 광주를 연속 회수했을 때의 소성영역으로 Fig. 2.16의 7개 광주 모두 회수하였을 때 보다는 훨씬 소성영역이 작아졌다. 하지만 보안광주에서 전체적으로 소성영역이 나타나고 있으며 회수 전에도 P4~P7은 모두 소성영역이 크게 발생한다.



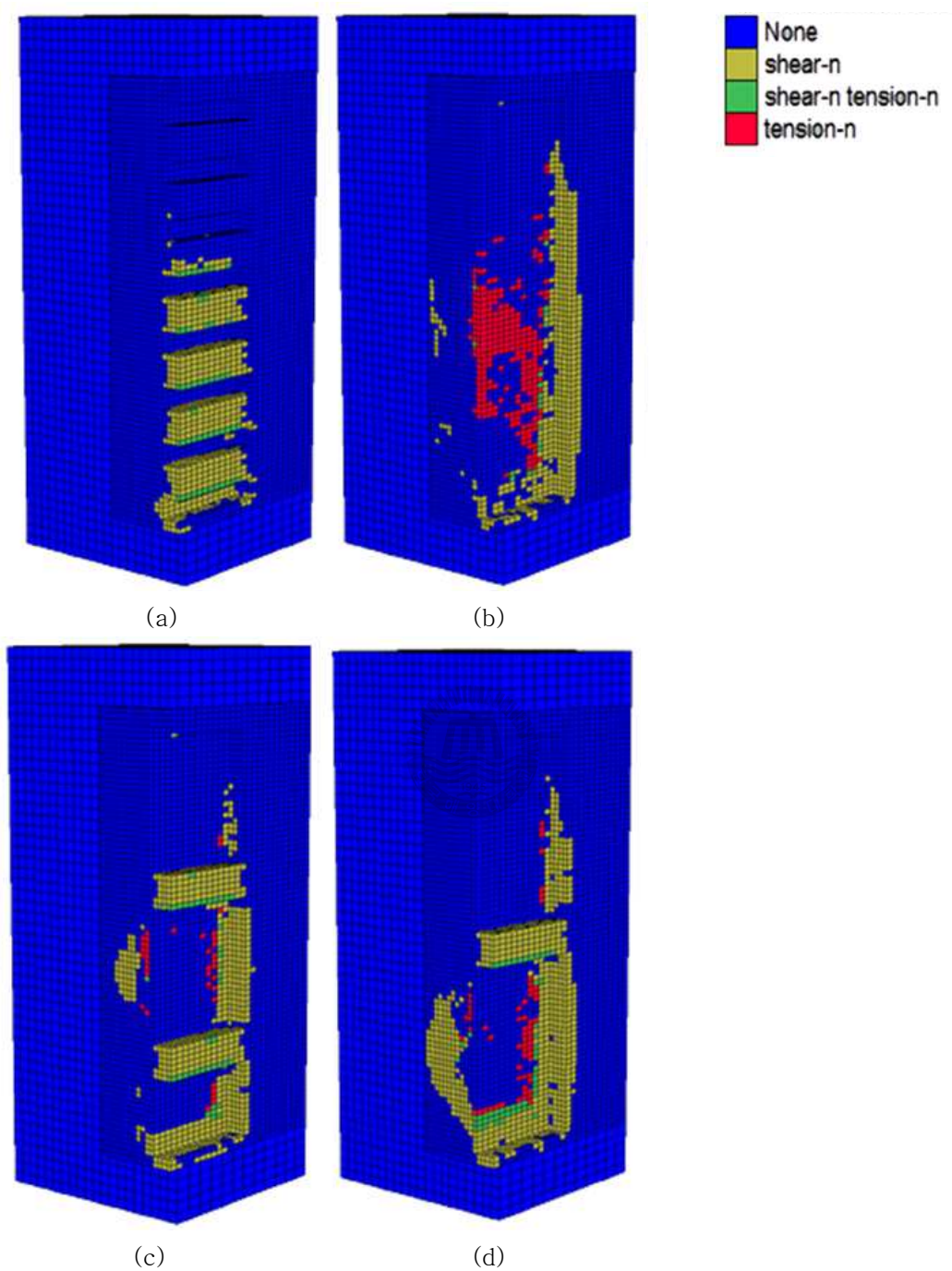


Fig. 2.18 Plasticity state relating to recovery of pillar (a) before recovery (b) recovery of all pillars (c) recovery of two pillars (d) recovery of three pillars

## 2.2.5 보안광주 높이에 따른 채광

채굴적 천반에 파쇄대가 형성된다고 하더라도 적정 광주를 보전한다면 광주에 발생하는 응력 집중을 충분히 견딜 수 있기 때문에 천반 붕락이 쉽게 지표까지 발전하지는 않지만(선우춘 등, 2006), 연속회수시 광주에 나타나는 소성영역으로부터 광주 회수를 고려한 채광 계획시 공동의 높이에 따른 광주의 높이는 광산에서 적용한 1.5배보다 좀 더 안전적인 두께를 선택하여야 함을 알 수 있다.

따라서 보안광주 높이에 따른 안정적인 채광을 검토하기 위하여 Fig. 2.13의 모델링 지반에서 맥폭과 높이는 같고, 동일한 방법으로 채광을 하되 보안광주의 높이를 변경해가면서 해석을 실시하였다. 보안광주는 안정성이 크게 요구되는 진입갱도와 수평적으로 같은 위치인 중단3 아래의 P3로 결정하였다. 보안광주의 높이를 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m로 변경하면서 광주에서의 응력집중과 지반의 소성영역 해석을 실시하였다.

보안광주 높이에 따른 응력집중은 Fig. 2.19에서와 같이 30m 이상이 되면 어느정도 수렴함을 알 수 있고, 지반의 소성영역은 Fig. 2.20에서와 같이 광주의 높이가 25m 이상에서는 보안광주 부분에서 현격히 줄어들지만, 하부 대형 공동은 광주의 높이와 상관없이 여전히 문제가 있는 것으로 나타났다.

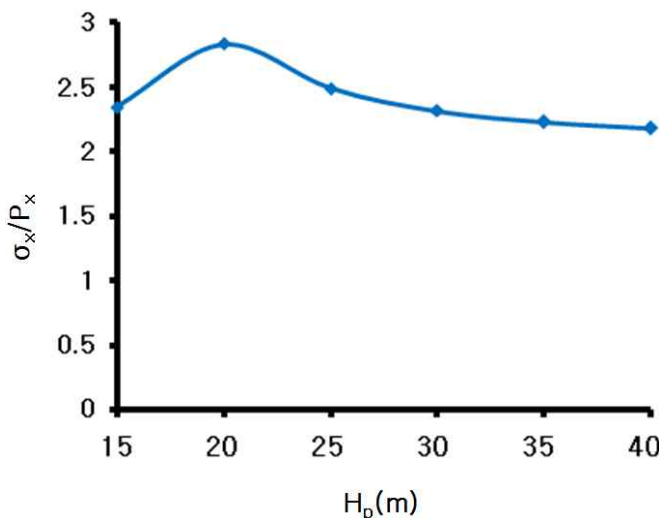


Fig. 2.19 Concentrated stress on residual pillar with increasing pillar height

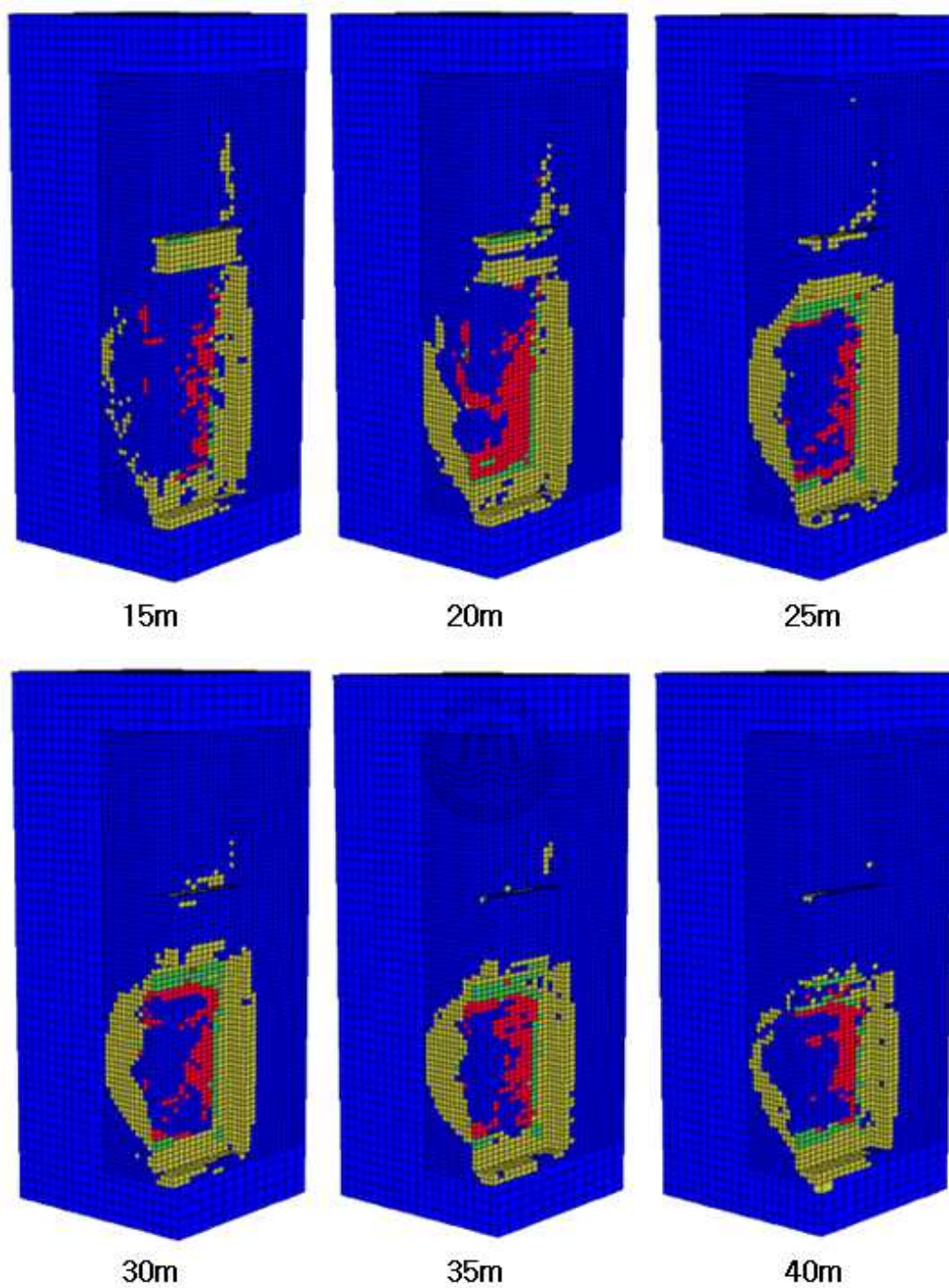


Fig. 2.20 Plasticity state relating to pillar height(residual pillar 1)



따라서 보안광주의 높이를 20m, 25m, 30m로 하여 상·하에 잔류시키고 해석을 실시하였다. 그 결과 Fig. 2.21에서와 같이 높이가 20m의 경우 하부 보안광주에서 전체적인 소성영역이 발생하였고, 25m와 30m에서는 보안광주나 측벽부 모두 양호하게 나타났다.

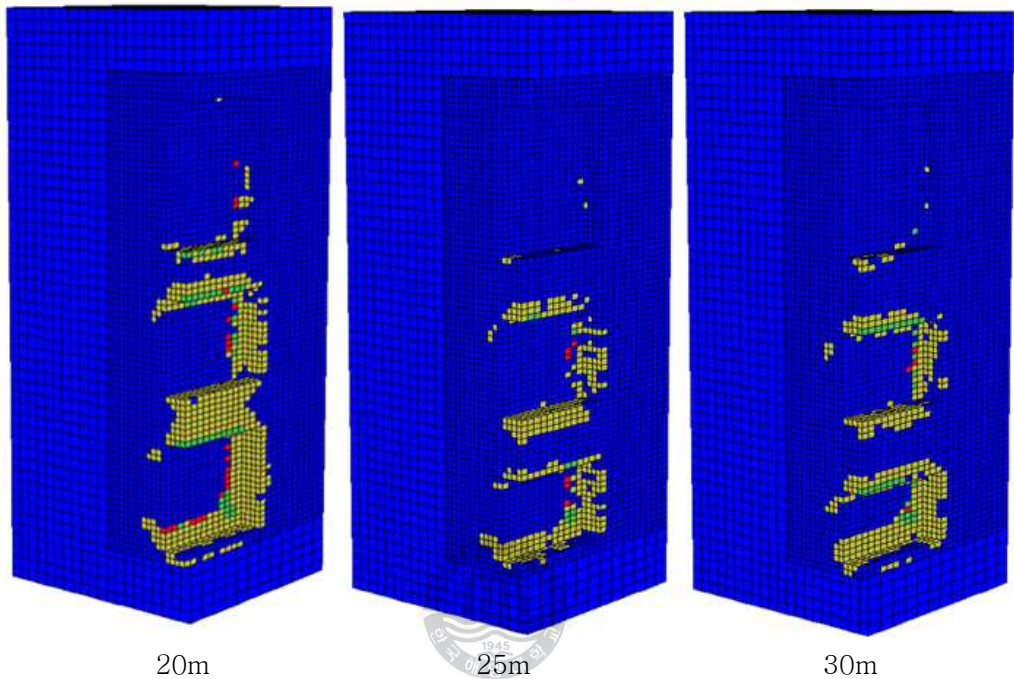


Fig. 2.21 Plasticity state relating to pillar height(residual pillar 2)



## 2.2.6 광맥 경사에 따른 비교

실제 연구대상 광산의 광맥 경사는  $65^\circ$ 내지 수직이므로, 경사에 따라 광주 회수의 영향을 알아보기 위해 Fig. 2.22와 같이 광맥 경사를  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ 로 변경하여 수치해석을 실시하였다. 해석은 1~8개 중단 굴착 후 상부에서 하부로 7개 광주를 회수하는 동안의 각각 천단부, 바닥부, 좌우 측벽에서의 변위량을 비교·검토하였다.

Fig. 2.23은 Fig. 2.22의 각각의 측점에서 광주 회수에 따른 변위량이다. 좌측벽에서 경사가 급할수록 변위량이 증가하고 있으나 전체적으로 경사가 낮을수록 변위량이 더 크게 발생하고 있다. 따라서 중단채광법 적용시 경사가 급할수록 천단부와 경사진 측벽이 안전해 질 것으로 기대된다. 광맥 경사  $60^\circ$ 의 우측벽에서는 6번째 광주 회수 후에 거의 붕락에 가까운 거동을 보이며 최종적으로 약 1.5m의 변위량이 발생하다. 따라서 지반의 역학적 특성 및 지질조건이 불리하고 광맥의 경사가 높지 않을 경우에 중단채광법 적용은 안정성 측면에서 신중히 검토되어야 한다.



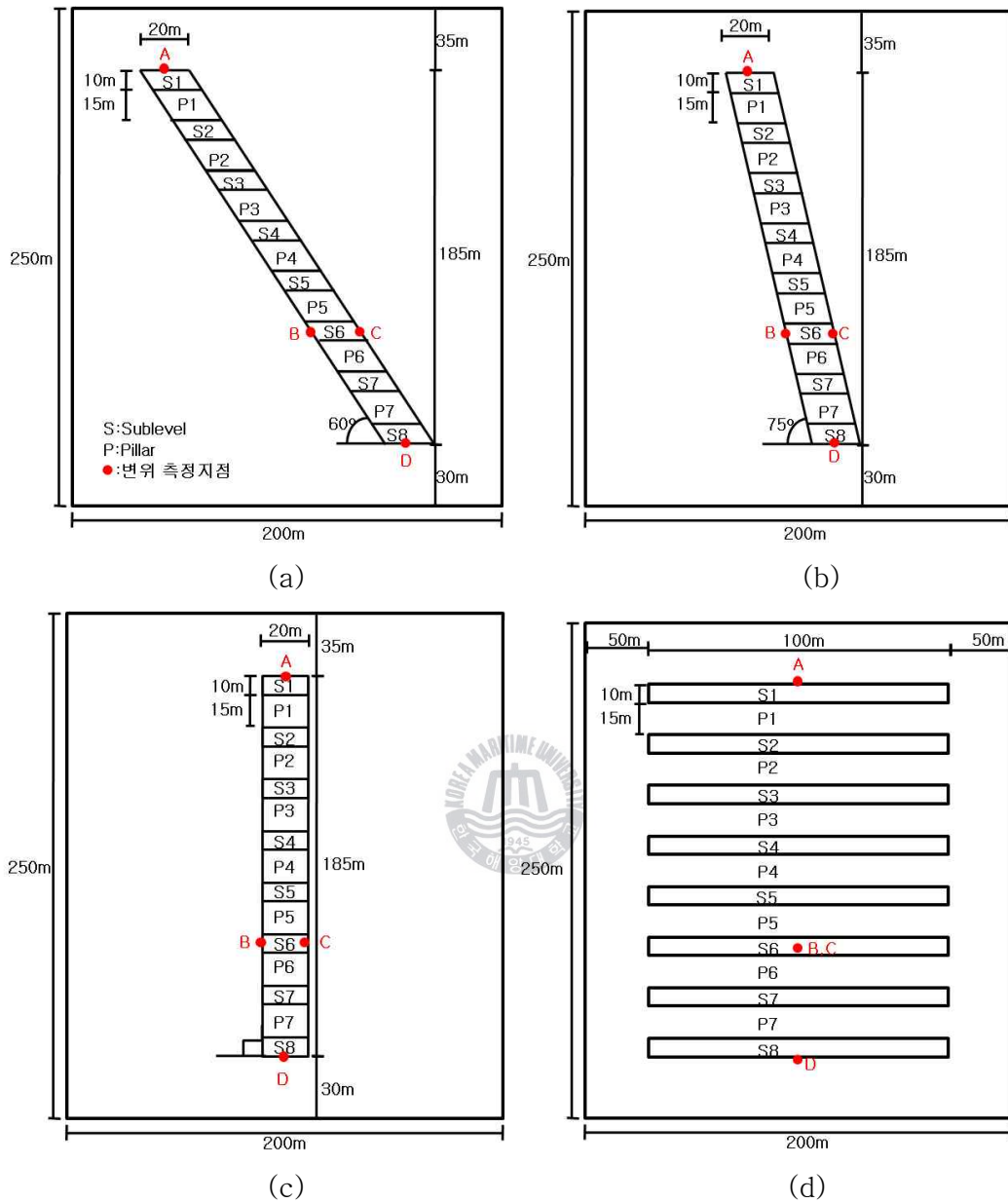
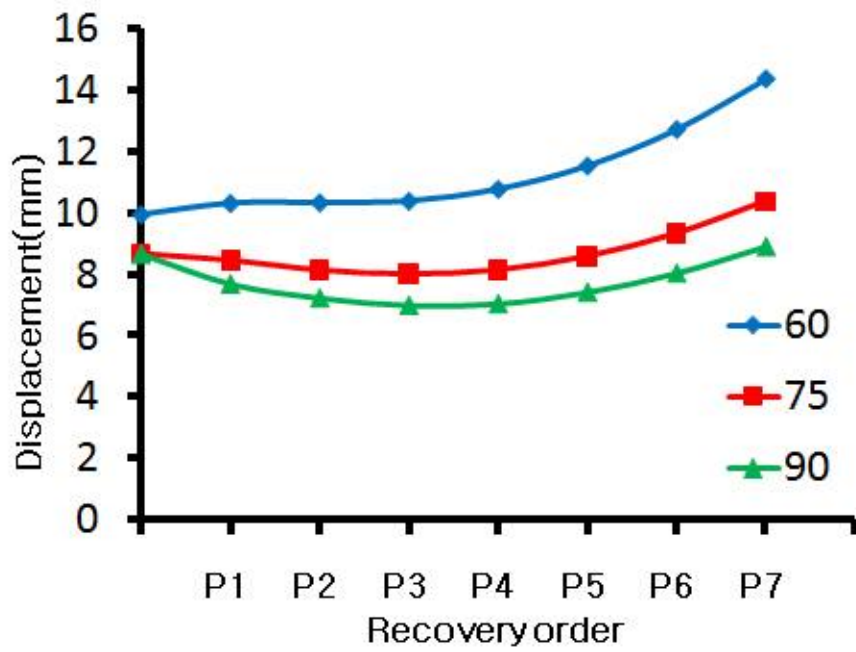
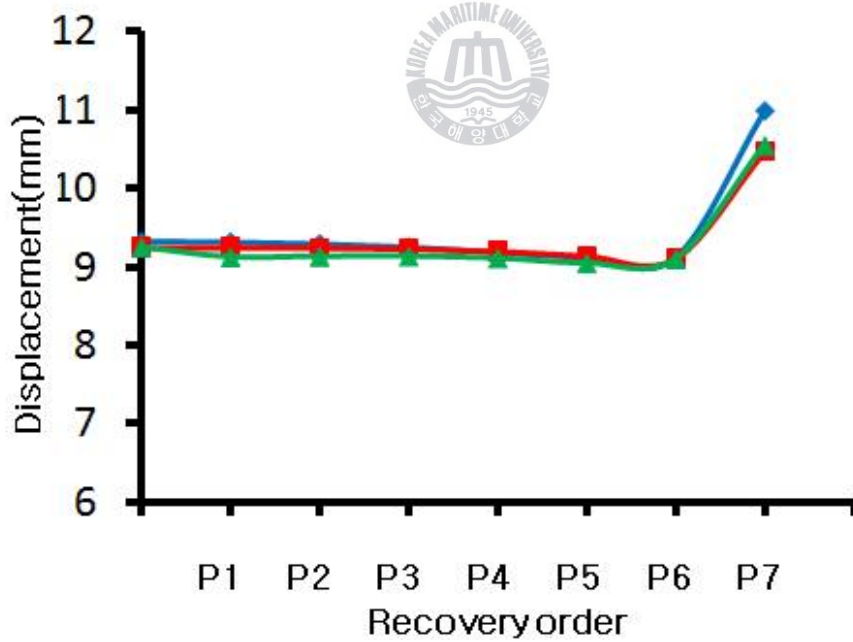


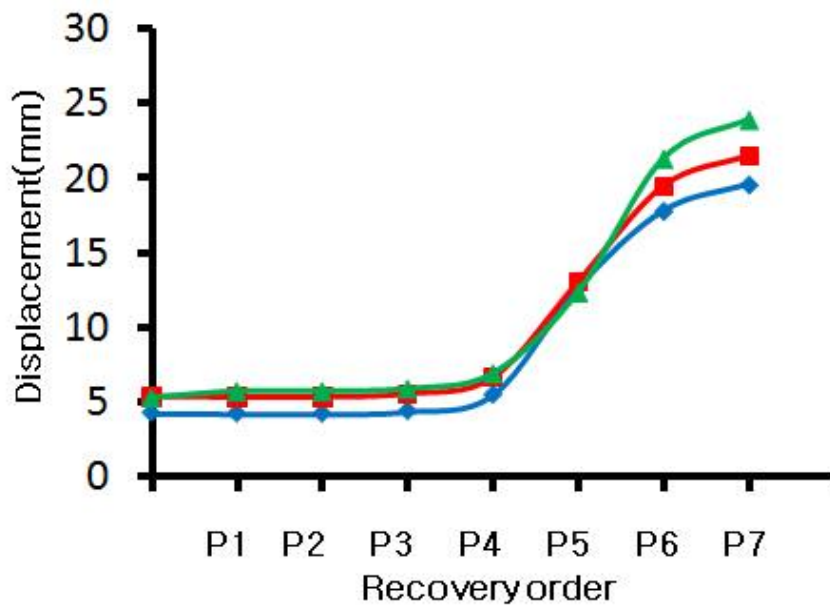
Fig. 2.22 Schematic layout versus various degree angles of orebody for numerical model (a) 60° (b) 75° (c) 90° (d) a side view



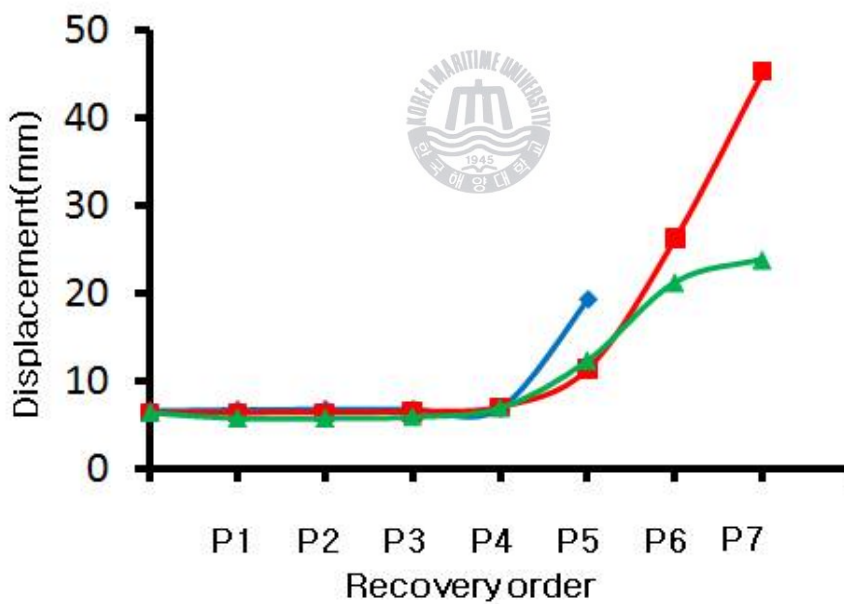
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2.23 Displacement versus various degree angles of orebody (a) Crown(A) (b) bottom(B) (c) lift wall(C) (d) right wall (D)

### 3. 결 론

본 논문에서는 최근 석회석 광산의 갱내채광으로의 전환과 대량생산에 따른 갱도의 대규모화 등으로 인한 갱도의 안정성 및 채광기술 연구를 위하여 광맥의 경사가 높은 광산에서 많이 사용되는 중단채광법을 적용할 경우에 대하여 중단간격과 광주회수 계획에 대하여 수치해석적 연구를 수행하였다.

갱내 광산 채광 설계에 중요한 요소 중 하나인 중단간격 검토를 위해 광주의 수평폭과 수직폭을 증가시키면서 원형, 정방형, 장방형의 공동에 대해 응력집중을 해석한 결과 갱도의 형상과 관계없이 광주의 폭이 공동의 폭에 비해 1.5배 이상이 되어야 하는 것으로 나타났다.

또한 연구대상 석회석 광산을 토대로 맥폭 185m, 두께 20m의 경사  $90^\circ$ 의 석회석 광맥에서 7개의 광주를 모두 회수할 경우에 대해 수치해석을 실시한 결과, 무지보 상태에서 모두 회수할 경우에 측벽에서의 넓은 소성영역이 나타났다. 따라서 보안광주를 유지하고 2개, 3개 광주씩 연속으로 회수할 경우에 대해 해석한 결과, 측벽은 충분히 안정되었지만 보안광주에서 전체적인 소성영역이 발생하였다. 보안광주의 안정성을 고려하여 광주의 높이를 변경하면서 해석을 실시한 결과 연구대상 광산에서는 25m 이상의 높이를 가지는 보안광주가 상·하부에 두 개는 존재하여야 측벽과 광주 모두 안정됨을 알 수 있었다.

광맥 경사가 각각  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  경사를 가지는 광체에 대하여 광주 회수에 따른 수치해석을 실시한 결과, 대체로 경사가 급한 광체일수록 천단부와 바닥부, 측벽부가 안전하였고,  $60^\circ$ 에서의 측벽부는 붕락에 가까운 거동을 보였다. 따라서 갱도 안정성 측면에서는 광맥의 경사가 높을수록 중단채광법 적용이 유리할 것으로 사료된다.

이상의 연구 결과, 중단채광법을 적용하는 석회석광산에서 중단 채광 후 광주를 회수할 경우 광주의 회수 방향은 상부에서 하부 방향으로 채광하는 것이 바람직하며, 대형 공동이 형성될 것으로 예상될 경우 채광 설계단계에서부터 공동의 폭과 높이에 따른 응력집중과 경사에 따른 영향을 고려하여 보안광주를 안전하게 설계 하여야 할 것으로 사료된다. 또한 이와 같은 내용은 연구대상광산의 결과이며 현장적용시 현장의 물성 및 역학적 특성, 불연속면의 발달 등을 고려한 설계가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- 구청모, 전석원, 이인우, 「석회석광산의 갱내채광설계 및 안정성평가」, 한국  
암반공학회지, 제18권, 제4호, pp.243-251(2008)
- 김웅수, 《자원·굴착공학》, 구미서관, 서울, pp.76-85(1998)
- 선우춘, 송원경, 류동우, Karanam U.M. Rao, 「D 석회석 폐광산의 지표침하  
원인분석 및 예상위험구역 예측」, 한국지구시스템공학회지, 제43권, 1  
호, pp.1-12(2006)
- 선우춘, 정소걸, 김민규, 최성웅, 전양수, 정용복, 이상권, 「석회석 광산 갱내  
채광장 및 갱도의 안전유지 기술연구」, 한국지질자원연구원(2003)
- 선우춘, 정소걸, 최성웅, 정용복, 전양수, 이상권, 「석회석 광산 갱내 채광장  
및 갱도의 안전유지 기술연구」, 한국지질자원연구원(2004)
- 선우춘, 정용복, 「석회석 지하채굴 광산에서의 암반파괴 및 갱도규격 연구」,  
한국지구시스템공학회지, 제43권, 5호, pp.416-428(2006)
- 선우춘, 정용복, 전양수, 이병주, 「하장광산의 갱내채광을 위한 채광설계 및  
안정성 연구」, 한국지구시스템공학회지, 제42권, 6호, pp. 575-587  
(2005)
- 신희순, 정소걸, 한공창, 선우춘, 송원경, 신중호, 최성웅, 박찬, 「석회석광산의  
적정갱도 규격 및 지보대책수립 연구」, 한국지질자원연구원, pp.1-3  
(1999)
- 윤용균, 이홍우, 2007, 「암반분류법을 이용한 석회석 광산 내 대규모 갱도의  
안정성 평가」, 한국암반공학회지, 제17권, 6호, pp. 503-510

임한욱, 「암반 내 응력과 그 측정에 관한 국내의 연구동향」, 한국국암반공학회 추계학술대회논문집, pp. 3-61(2005)

지식경제부와 한국지질자원연구원, 《광산물 수급현황》(1996-2008)

한국광물자원공사, 《우리나라 광산개발 현황》, pp-32(2006)

Brady B.H.G. and Brown E.T., 《Rock mechanics for underground mining》, 3rd Ed, Springer press, pp. 370-379(2004)

Goodman Richard E., 《Introduction to Rock Mechanics》, 2nd Ed, New York, John Willey & Sons, pp. 80-83(1989)

ITASCA Consulting, 《FLAC 3D User's manual》, Version 3.1, Vol. 1, 2, 3(2006)

Obert, L. and Duvall, W.I., 《Rock Mechanics and the Design of Structures in rock》, John Wiley & Sons, pp.650(1976)

## 감사의 글

먼저 본 논문이 있기까지 아낌없는 격려와 지원을 해주시고 능력뿐만 아니라 인격적으로도 바른 사람이 되도록 지도해주신 장원일 교수님께 존경과 감사의 말씀을 드립니다.

연구와 학과일정으로 바쁜신 와중에도 논문을 검토하고 격려해주신 신성렬 교수님, 임종세 교수님, 윤지호 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 항상 논문 진행사항을 물으시고 조언해주신 김성운 교수님, 성규열 교수님에게도 감사드립니다. 또한 바쁜 광산 일정에도 흔쾌히 견학을 허락해주신 대성 MDI의 최수근 과장님과 현장 관계자 분들에게 다시 한번 감사의 말씀을 전합니다.

졸업하고 나서도 관심을 가지고 따뜻한 격려해준 서동일 선배님과 논문을 작성하는 동안 실험실 일을 도맡아 주고 도와준 윤경이와 진이, 그리고 저를 믿고 따라준 동철이와 수강이에게도 고마운 마음을 전합니다. 또한 관심을 가지고 도와준 물리탐사 실험실, 석유공학 실험실, 친환경 공학 실험실 선·후배들과 황정주 조교선생님에게도 고마움을 전합니다.

학업에만 열중할 수 있도록 항상 저를 믿고 사랑해주신 아버지, 어머니와 든든한 후원자인 누나들에게도 이 자리를 빌어서 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 5년에 가까운 실험실 생활동안 제가 이 자리까지 성장할 수 있도록 지도해주시고 따뜻한 사랑을 베풀어 주신 장원일 교수님과 한국해양대학교 에너지자원공학과 교수님들께 다시 한번 감사의 말씀을 드립니다.

2009년 12월  
김 동 호 올림